



Sara Raquel  
Ferreira de Matos

Otimização da Estiva de Navios  
Porta-Contentores: Um Caso de Estudo do Porto  
da Figueira da Foz





**Sara Raquel  
Ferreira de Matos**

**Otimização da Estiva de Navios  
Porta-Contentores: Um Caso de Estudo do Porto  
da Figueira da Foz**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Matemática e Aplicações, realizada sob orientação científica de Jorge Manuel Sá Esteves, Professor Auxiliar do Departamento de Matemática da Universidade de Aveiro e de Ana Maria Pinto Moura, Professora Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo da Universidade de Aveiro.





## **O júri / The jury**

Presidente / President

**Prof. Doutor Domingos Moreira Cardoso**

Professor Catedrático do Departamento de Matemática da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

**Prof. Doutor Bernardo Sobrinho Simões de Almada Lobo**

Professor Associado do Departamento de Engenharia e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

**Prof. Doutora Ana Maria Pinto Moura**

Professora Auxiliar do Departamento de Economia, Gestão, Engenharia Industrial e Turismo da Universidade de Aveiro (Coorientadora)



## Agradecimentos / Acknowledgements

Agradeço, em primeiro lugar, à pessoa mais importante e imprescindível no meu percurso académico e em toda a minha vida, o meu pai. Agradeço-lhe pelas oportunidades que me proporcionou e por acreditar e apostar sempre em mim. Agradeço carinhosamente à minha mãe pela constante preocupação e por demonstrar sempre orgulho na pessoa que sou e no que faço. Um enorme agradecimento à minha avó, tia e prima pelo apoio e paciência e por lutarem sempre ao meu lado.

Agradeço, em especial, ao meu orientador, professor Jorge Sá Esteves, e à minha coorientadora, professora Ana Moura, pela disponibilidade e pelos conhecimentos partilhados.

Agradeço também à administração do porto de Aveiro e do porto da Figueira da Foz pelo acolhimento, em particular, ao Sr. Luís Sousa pela sua enorme prontidão em ajudar-me. Um agradecimento, ainda, ao Sr. Arménio Cruz, representante da operadora *Liscont* pela facultação de dados importantes usados na minha dissertação.

Agradeço verdadeiramente a todos os meus amigos pelos momentos de descontração, pelos sorrisos que me proporcionam e, acima de tudo, pelo companheirismo.

Por fim e não menos importante, agradeço ao Diogo, pelo carinho das suas palavras que me levam a nunca desistir, pela sua compreensão e pelos seus sábios conselhos.



## Palavras-chave

*Container Stowage Problem*, *Layout* do Parque de Contentores, *Overstow*, Contentor, Navio Porta-Contentores, Parque de Contentores, Porto da Figueira da Foz

## Resumo

Na presente dissertação são abordadas duas temáticas de grande relevância na indústria marítima, mais concretamente no transporte marítimo de carga contentorizada, visto que hoje em dia os portos apresentam um ambiente complexo, existindo a necessidade de encontrar métodos eficientes para a gestão dos mesmos.

A primeira temática a ser abordada trata-se da alocação de contentores num navio porta-contentores (*Container Stowage Problem*). Esta operação necessita ser realizada rápida e eficazmente, portanto tomou-se como objetivo principal desta dissertação a minimização do número de *overstows*. Entenda-se por *overstow* a situação em que um contentor necessita de ser descarregado no seu porto de destino, no entanto é bloqueado por outro contentor com um destino diferente.

O caso de estudo toma lugar no porto da Figueira da Foz, sendo que na realização deste trabalho são usados dados fornecidos pela operadora encarregue da movimentação de contentores no referido porto.

Apresenta-se então um modelo de programação linear para o problema mencionado, que é validado através de diversas instâncias testadas no *software* auxiliar *Xpress Optimizer*. Este trabalho visa ser uma ferramenta de apoio à elaboração de planos de estiva, tendo em conta a principal finalidade.

Por fim, a segunda temática diz respeito ao *layout* do parque de contentores, já que esta influencia e intervém bastante no problema de alocação de contentores nos navios porta-contentores. Assim, sugere-se uma redefinição do *layout* do parque de contentores do porto acima referido, explicando cada estratégia proposta e comparando-as às estratégias praticadas neste momento no referido porto.



**Keywords**

Container Stowage Problem, Container Yard Layout, Overstow, Container, Containership, Container Yard, Port of Figueira da Foz

**Abstract**

This dissertation approaches two main issues related to maritime industry, notably in containerized cargo, since nowadays ports are a very complex environment, and given that, there's a need for their efficient management. The first issue deals with the stowage of containers in a containership (Container Stowage Problem) and this process has to be made efficiently and quickly. Thus, the minimization of the number of overstows is the main aim of this work. Overstow happens when a container needs to be discharged at its destination but is locked by another container with another destination. The study case takes place in the port of Figueira da Foz. So their characteristics are taken in account and the necessary data are provided by the company accountable for the containers movement at the said port. A linear programming model is presented for the previous problem and it is validated by several instances, which are tested with the software *Xpress Optimizer*. This work is a decision support tool for the development of stowage planes bearing in mind the minimization of overstows. Finally, the second issue is about containers yard layout, since that has a tremendous influence on the Container Stowage Problem. So, a redefinition of container yard layout for such port is suggested and each strategy is explained comparing them to the practiced strategies at the moment.





# Conteúdo

<b>Conteúdo</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Siglas e Abreviaturas</b>	<b>vii</b>
<b>Glossário</b>	<b>ix</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento do Problema . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	4
1.3 Estrutura da Dissertação . . . . .	4
<b>2 Transporte Marítimo de Contentores</b>	<b>7</b>
2.1 Contentores . . . . .	7
2.2 Navios Porta-Contentores . . . . .	9
2.2.1 Estrutura Física . . . . .	9
2.2.2 Estabilidade e Força . . . . .	11
2.3 Terminal de Contentores . . . . .	12
<b>3 Revisão do Estado da Arte</b>	<b>15</b>
3.1 Container Stowage Problem (CSP) . . . . .	15
3.2 Layout de Parques de Contentores . . . . .	19
<b>4 Caso de Estudo</b>	<b>23</b>
4.1 Porto da Figueira da Foz . . . . .	23
4.2 Descrição do Problema . . . . .	24
4.3 Formulação Matemática Para o CSP . . . . .	28
4.3.1 Caracterização das Instâncias Para o CSP . . . . .	31
4.4 Solução Proposta Para a Redefinição do Layout do Parque de Contentores	33
<b>5 Resultados e Discussão</b>	<b>37</b>
5.1 Modelo de Programação Linear Para o CSP . . . . .	37
5.2 Resolução do Modelo em SolverStudio . . . . .	44
5.2.1 <i>Excel</i> e <i>SolverStudio</i> . . . . .	44
5.2.2 Construção de Um Modelo no <i>SolverStudio</i> . . . . .	45

5.2.3	Criação e Resolução do Modelo Para o CSP Descrito na Secção 4.3 no <i>SolverStudio</i> . . . . .	46
5.2.4	<i>Snapshots</i> do ficheiro desenvolvido em <i>Excel</i> . . . . .	56
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalho Futuro</b>	<b>61</b>
	<b>Referências</b>	<b>63</b>
<b>A</b>	<b>Anexos</b>	<b>67</b>
A.1	Informação Referente ao Movimento de Contentores nos Principais Portos de Portugal Continental, de 2004 a 2014 . . . . .	67
A.2	Exemplo de Um Plano de Estiva do Navio <i>Wec Brueghel</i> . . . . .	68
A.3	Informação Referente ao Tráfego da Carga Contentorizada no Porto da Figueira da Foz no Ano de 2014 . . . . .	69
A.4	Instâncias Usadas na Validação do Modelo Matemático Proposto Para o CSP com 2 Portos de Destino . . . . .	70
A.5	Instâncias Usadas na Validação do Modelo Matemático Proposto Para o CSP com 5 Portos de Destino . . . . .	74
A.6	Instâncias Usadas na Validação do Modelo Matemático Proposto Para o CSP com 10 Portos de Destino . . . . .	80

# Lista de Tabelas

1.1	Mercadorias movimentadas por tipo de transporte desde 2010 até 2014, segundo o INE . . . . .	1
2.1	Classificação dos navios porta-contentores segundo a sua capacidade de carga . . . . .	10
4.1	Valor fixado para certos parâmetros de entrada da formulação do CSP . .	31
5.1	Resultados obtidos para o CSP com 2 portos de destino, no <i>Xpress Optimizer</i> , usando a formulação mencionada na Secção 4.3 . . . . .	38
5.2	Resultados obtidos para o CSP com 5 portos de destino, no <i>Xpress Optimizer</i> , usando a formulação mencionada na Secção 4.3 . . . . .	39
5.3	Resultados obtidos para o CSP com 10 portos de destino, no <i>Xpress Optimizer</i> , usando a formulação mencionada na Secção 4.3 . . . . .	40
5.4	Resultados obtidos para o CSP, no <i>Excel</i> com o auxílio do <i>SolverStudio</i> , usando a formulação mencionada na Secção 4.3 . . . . .	51
A.1	Movimento de contentores nos principais portos do continente português desde 2004 até 2014, segundo o IMT . . . . .	67
A.2	Tráfego de carga contentorizada no porto da Figueira da Foz de Janeiro a Novembro do ano de 2014 . . . . .	69
A.3	Instância 15 . . . . .	70
A.4	Instância 2 . . . . .	70
A.5	Instância 3 . . . . .	70
A.6	Instância 4 . . . . .	70
A.7	Instância 5 . . . . .	71
A.8	Instância 6 . . . . .	71
A.9	Instância 7 . . . . .	71
A.10	Instância 8 . . . . .	71
A.11	Instância 9 . . . . .	71
A.12	Instância 10 . . . . .	72
A.13	Instância 11 . . . . .	72
A.14	Instância 12 . . . . .	72
A.15	Instância 13 . . . . .	72
A.16	Instância 14 . . . . .	72
A.17	Instância 15 . . . . .	73
A.18	Instância 16 . . . . .	73

A.19 Instância 17 . . . . .	73
A.20 Instância 18 . . . . .	73
A.21 Instância 1 . . . . .	74
A.22 Instância 2 . . . . .	74
A.23 Instância 3 . . . . .	75
A.24 Instância 4 . . . . .	75
A.25 Instância 5 . . . . .	75
A.26 Instância 6 . . . . .	76
A.27 Instância 7 . . . . .	76
A.28 Instância 8 . . . . .	76
A.29 Instância 9 . . . . .	77
A.30 Instância 10 . . . . .	77
A.31 Instância 11 . . . . .	77
A.32 Instância 12 . . . . .	78
A.33 Instância 13 . . . . .	78
A.34 Instância 14 . . . . .	78
A.35 Instância 15 . . . . .	79
A.36 Instância 16 . . . . .	79
A.37 Instância 17 . . . . .	79
A.38 Instância 18 . . . . .	80
A.39 Instância 1 . . . . .	80
A.40 Instância 2 . . . . .	81
A.41 Instância 3 . . . . .	81
A.42 Instância 4 . . . . .	82
A.43 Instância 5 . . . . .	82
A.44 Instância 6 . . . . .	83
A.45 Instância 7 . . . . .	83
A.46 Instância 8 . . . . .	84
A.47 Instância 9 . . . . .	84
A.48 Instância 10 . . . . .	85
A.49 Instância 11 . . . . .	85
A.50 Instância 12 . . . . .	86
A.51 Instância 13 . . . . .	86
A.52 Instância 14 . . . . .	87
A.53 Instância 15 . . . . .	87
A.54 Instância 16 . . . . .	88
A.55 Instância 17 . . . . .	88
A.56 Instância 18 . . . . .	89

# Lista de Figuras

1.1	Mercadorias movimentadas por transporte marítimo desde 2010 até 2014, segundo o INE . . . . .	2
1.2	Total de contentores movimentados em alguns portos nacionais referente aos anos de 2004 a 2014, segundo o IMT . . . . .	2
1.3	Esquema de uma situação em que ocorre <i>overstow</i> numa pilha de contentores . . . . .	4
2.1	Exemplo de uma placa CSC ( <i>Container Safety Convention</i> ) . . . . .	7
2.2	Exemplos de contentores com as dimensões padrão . . . . .	8
2.3	Áreas de um terminal e fluxo de transporte de contentores . . . . .	9
2.4	Vista frontal de uma <i>bay</i> e vista lateral de uma pilha . . . . .	10
2.5	Estrutura do espaço de carga de um navio: plano plano transversal, plano longitudinal e plano base . . . . .	11
2.6	Exemplos de alguns equipamentos usados na movimentação de contentores em diferentes portos . . . . .	12
4.1	Mapa do porto da Figueira da Foz delimitado por áreas e esquema acerca das ligações entre o porto da Figueira da Foz e outros no que diz respeito ao transporte de mercadorias . . . . .	24
4.2	Equipamentos usados pela operadora Liscont na movimentação de contentores . . . . .	25
4.3	Navio porta-contentores <i>Wec Brueghel</i> . . . . .	25
4.4	Disposição das áreas referentes à movimentação de contentores no terminal do porto da Figueira da Foz . . . . .	27
4.5	Camião usado no transporte dos contentores entre o complexo industrial do grupo <i>The Navigator Company</i> situado na Figueira da Foz e o terminal de granéis sólidos do porto da Figueira da Foz . . . . .	28
4.6	Vista frontal das <i>bays</i> do navio <i>Wec Brueghel</i> . . . . .	32
4.7	Representação da estratégia de arrumação de contentores no parque do terminal do porto da Figueira da Foz, praticada pela <i>Liscont</i> . . . . .	33
4.8	Representação da proposta referente ao <i>layout</i> do parque de contentores do terminal do porto da Figueira da Foz . . . . .	36
5.1	Comportamento do tempo computacional em função do número de portos de destino . . . . .	41
5.2	Comportamento do número de variáveis em função do número de portos de destino . . . . .	42

5.3	Comportamento do número de restrições em função do número de portos de destino . . . . .	42
5.4	Representação da solução obtida para a instância 14, no <i>Xpress Optimizer</i>	43
5.5	Representação da solução obtida para a instância 17, no <i>Xpress Optimizer</i>	44
5.6	Comportamento do tempo computacional obtido na geração das soluções no <i>Xpress Optimizer</i> e no <i>SolverStudio</i> ) . . . . .	52
5.7	Representação da solução obtida para a instância 14, no <i>SolverStudio</i> . . .	53
5.8	Representação da solução obtida para a instância 17, no <i>SolverStudio</i> . . .	54
5.9	<i>Snapshot</i> do ficheiro desenvolvido em <i>Excel</i> como contributo para a empresa: escolha dos valores para os parâmetros de entrada para a instância 17 da Secção A.4 . . . . .	56
5.10	<i>Snapshot</i> do ficheiro desenvolvido em <i>Excel</i> como contributo para a empresa: configuração dos dados usando o botão <i>Edit Data</i> do <i>SolverStudio</i> .	57
5.11	<i>Snapshot</i> do ficheiro desenvolvido em <i>Excel</i> como contributo para a empresa: apresentação do número de <i>overstows</i> na solução gerada para a instância 17 da Secção A.4 . . . . .	58
5.12	<i>Snapshot</i> do ficheiro desenvolvido em <i>Excel</i> como contributo para a empresa: visão geral do ficheiro quando gerada a solução para a instância 17 da Secção A.4 . . . . .	59
A.1	Plano de estiva do navio <i>Wec Brueghel</i> referente a um carregamento de Fevereiro de 2016 . . . . .	68

# Lista de Siglas e Abreviaturas

IMT      Instituto da Mobilidade e dos Transportes

INE      Instituto Nacional de Estatística

CSP      *Container Stowage Problem*

CSC      *Container Safety Convention*

TEU      *Twenty-feet equivalent unit*

FEU      *Forty-feet equivalent unit*

AGV      *Automated Guided Vehicles*

LIFO      *Last in - First Out*

PuLP      *Linear Programming Toolkit for Python*

AMPL      *A Mathematical Programming Language*

CMPL      *COIN Mathematical Programming Language*

GMPL      *GNU Mathematical Programming Language*

GAMS      *General Algebraic Modeling System*





# Glossário

**Bombordo** - Lado esquerdo da embarcação para quem olha para a proa, oposto a estibordo.

**Cais** - Plataforma fixa, nos portos, destinada à atracação de embarcações para operações de carga/descarga de passageiros ou mercadorias.

**Casco** - Corpo de qualquer embarcação, isto é, o conjunto de componentes que formam o invólucro exterior do navio.

**Convés** - Estrutura em forma de pavimento ou piso que subdivide horizontalmente os espaços da embarcação.

**Empresa de estiva** - Empresa que tem a seu cargo a carga/descarga de mercadoria de uma qualquer embarcação e a arrumação da mesma nas diversas áreas de um terminal, usando exclusivamente a infraestrutura e superestrutura desse mesmo terminal.

**Escotilha** - Abertura praticada num convés para passagem de pessoas, carga, ar e luz.

**Estibordo** - Lado direito da embarcação para quem olha para a proa.

**Hinterland** - Área de comunicação entre os diversos meios de transporte que atuam nas operações portuárias, correspondendo às áreas de influência do porto.

**Operadora** - Empresa que tem a seu cargo a carga/descarga de mercadoria de uma qualquer embarcação e a arrumação da mesma nas diversas áreas de um terminal, tendo a concessão da infraestrutura do mesmo terminal e usando a sua própria superestrutura.

**Plano de estiva** - Plano onde são descritas as quantidades e o tipo de mercadorias transportadas para carga/descarga bem como a sua localização na embarcação.

**Popa** - Extremidade posterior de qualquer embarcação onde se situa o leme (lado contrário da proa), geralmente com formato adelgado mas não tanto quanto a proa.

**Porão** - Cada um dos espaços estanques, entre o fundo ou o teto do duplo fundo e a cobertura imediatamente superior, destinados à arrumação de carga.

**Proa** - Extremidade anterior de qualquer embarcação, geralmente de forma afilada

para melhor fender as águas.

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento do Problema

A globalização da economia promoveu um aumento das trocas comerciais, desencadeando o crescimento do transporte marítimo de mercadorias, sendo possível confirmar esse facto com dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Estatística (INE), referentes aos últimos cinco anos (Tabela 1.1 e Figura 1.1).

TIPOS DE TRANSPORTE	ANOS				
	2010	2011	2012	2013	2014
Ferroviário	10094	9975	9701	9291	10305
Rodoviário	217915	219807	147473	147304	145990
Marítimo	58920	61263	62111	72173	74904
Aéreo	215	205	195	187	196

Tabela 1.1: Mercadorias movimentadas por tipo de transporte desde 2010 até 2014, segundo o INE (Unidade:  $10^3$  toneladas).

O transporte acima destacado apresenta características únicas, nomeadamente a sua elevada capacidade de carga, os seus custos reduzidos, quando comparados a outros transportes, e a sua eficiência a nível energético. Dentro do transporte marítimo de mercadorias destaca-se o transporte de contentores.

O transporte de carga contentorizada tem crescido a larga escala e mantém uma trajetória ascendente, como se comprova segundo os dados disponibilizados pelo Instituto da Mobilidade e dos Transportes (IMT), (Figura 1.2). Tal explica-se através de vários fatores, tais como, a diminuição do tempo de trânsito, o aumento da confiabilidade e segurança e, ainda, a intermodalidade. Note-se que apenas se verifica um decréscimo no ano de 2009, mas sem significância, podendo este dever-se a fatores externos e variados.

Hoje em dia, o contentor é o principal tipo de equipamento utilizado no transporte intermodal, isto é, o contentor é caracterizado por uma unidade de carga padronizada

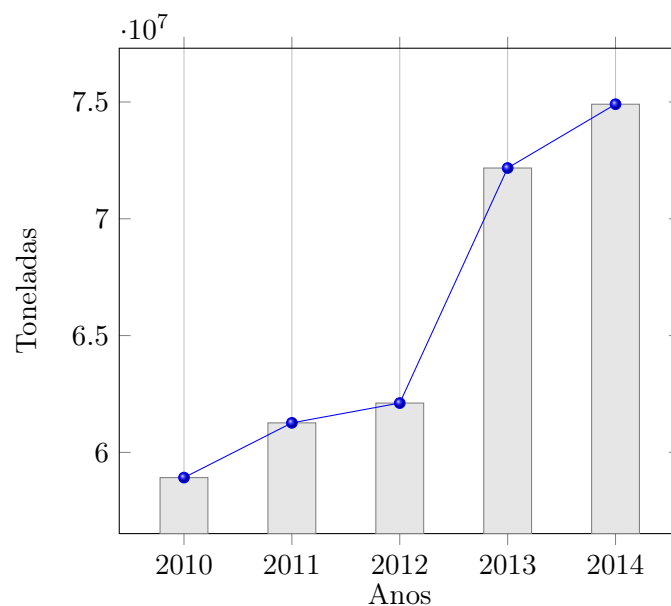


Figura 1.1: Mercadorias movimentadas por transporte marítimo desde 2010 até 2014, segundo o INE.

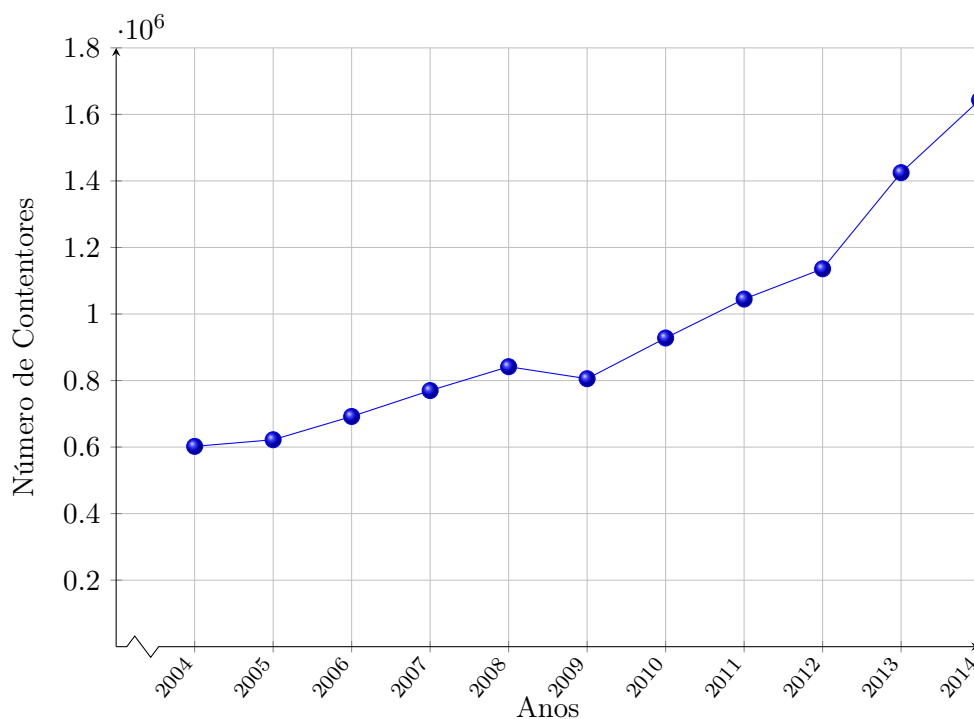


Figura 1.2: Total de contentores movimentados em alguns portos nacionais (portos do Douro e Leixões, porto da Figueira da Foz, porto de Lisboa, porto de Setúbal e porto de Sines), referente aos anos de 2004 a 2014, segundo o IMT (Dados apresentados na Tabela A.1).

que é adequada para qualquer tipo de transporte (aéreo, terrestre ou marítimo), podendo ser transferido rapidamente de um transporte para outro. Desta forma, os terminais de contentores tornam-se as principais conexões entre os diferentes tipos de transporte e movimentação de mercadorias, representando um ponto crítico da cadeia de distribuição.

Tendo em conta o ambiente complexo que os portos apresentam, surge a necessidade de encontrar métodos eficientes para a gestão dos mesmos. Por consequência, o interesse em introduzir inovações tecnológicas, desenvolvendo estudos e algoritmos que otimizem o planeamento de estiva, tem aumentado.

O processo de carga e descarga necessita de ser feito de forma rápida e eficaz, porém o facto dos navios porta-contentores de hoje possuírem uma grande capacidade de carga, implica que sejam feitos milhares de movimentos de contentores, o que dificulta a eficiência operacional do porto e aumenta o tempo de permanência dos navios porta-contentores no mesmo. Assim, o problema de alocação de contentores num navio porta-contentores, designado por *Container Stowage Problem* (CSP) é um problema NP-difícil, como é referido, por exemplo, em [10] e [9]. Para além disso, não é possível, num tempo computacional aceitável, obter soluções ótimas para o problema referido.

Gerar boas soluções para o CSP manualmente é, por norma, um processo moroso e complexo, devido à arrumação dos contentores nos navios porta-contentores inter-relacionar inúmeras decisões e apresentar variadas restrições, tais como as referentes à estabilidade do navio porta-contentores, entre outras associadas às regras portuárias. Assim, para facilitar a execução desta tarefa, o CSP pode e deve ser resolvido computacionalmente.

Torna-se, então, importante obter planos de estiva que minimizem o número total de *overstows*, sendo esta a finalidade principal desta dissertação.

*Overstow* é definido como a remoção e realocação de um contentor num navio porta-contentores quando este se encontra a bloquear o acesso a um ou mais contentores (Figura 1.3). Note-se que quanto maior o número de *overstows* no processo de descarga dos contentores, maior é o tempo de permanência do navio porta-contentores no cais, o que se traduz, também, em custos operacionais mais elevados.

Concluindo, a presente dissertação incide sobre o CSP, abordando também a temática referente ao *layout* dos parques de contentores nos terminais, visto estes serem fatores que influenciam fortemente a eficiência e o desempenho de qualquer terminal. Assim, o principal objetivo desta dissertação é fornecer soluções e técnicas para otimizar eficientemente as operações referentes a um porto em especial, o porto da Figueira da Foz.

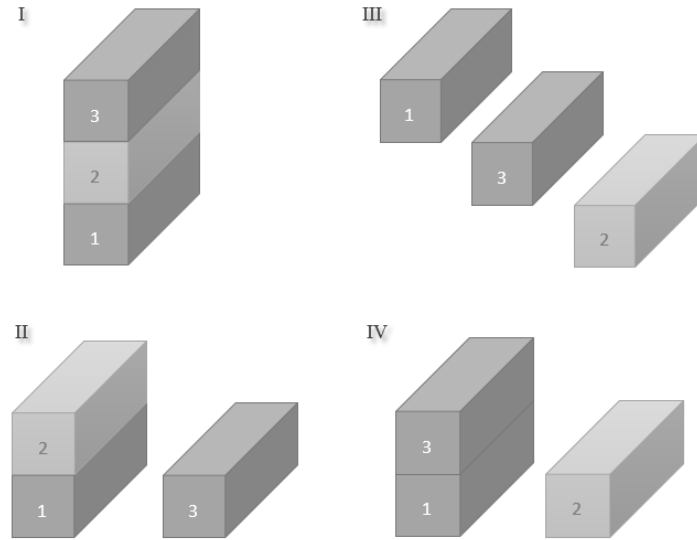


Figura 1.3: Esquema de uma situação em que ocorre *overstow* numa pilha de contentores: o contentor n.º 2 necessita ser descarregado no seu porto de destino, mas está a ser bloqueado pelo contentor n.º 3 que tem como destino outro porto.

## 1.2 Objetivos

Com esta dissertação pretende-se desenvolver uma ferramenta de apoio à elaboração de planos de estiva, partindo da modelação e formulação matemática do CSP. Pretende-se ainda desenvolver um estudo acerca do *layout* do parque de contentores no terminal do porto da Figueira da Foz, de forma a melhorar a gestão das operações presentes no terminal do porto em causa.

O CSP tem como objetivo principal a minimização do número total de *overstows*, visto que por consequência minimizará o tempo do processo de carga/descarga dos contentores no navio porta-contentores.

O estudo relativo ao *layout* do parque tem como propósito a redefinição do mesmo de acordo com algumas restrições, pretendendo-se comparar a arrumação do parque praticada pela operadora presente no terminal e a proposta nesta dissertação, de forma a retirar conclusões acerca dos fatores mais influentes e obter melhorias nos vários processos presentes no porto em questão.

## 1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está dividida em sete capítulos.

No primeiro capítulo é feito um enquadramento do tema abordado e uma breve descrição dos seus principais objetivos.

O capítulo segundo aborda as principais componentes do transporte marítimo de contentores de forma a introduzir o leitor no tema, isto é, é dada a definição de contentor, navio porta-contentores e terminal portuário, sendo ainda apresentadas várias características desses componentes.

No terceiro capítulo é feita uma revisão bibliográfica da literatura mais relevante na área abordada nesta dissertação, nomeadamente o CSP e o *layout* de parques de contentores.

No quarto capítulo é dado a conhecer o caso em estudo. São, então, descritos os problemas de otimização a ser tratados num certo porto marítimo, salientando as suas principais características e as restrições a que estão sujeitos. Neste capítulo é apresentado um modelo matemático para o CSP e as várias instâncias usadas na obtenção de resultados. Por fim, é apresentada uma redefinição do layout do parque de contentores do terminal em questão e são explicadas e justificadas todas as estratégias propostas.

No capítulo quinto são expostos e analisados os resultados obtidos pelo modelo desenvolvido no capítulo anterior. E é ainda apresentado um contributo para a empresa que atua no manuseamento e movimentação dos contentores no porto em causa no caso de estudo.

No sétimo e último capítulo são apontadas as conclusões retiradas no decorrer desta dissertação e são sugeridas algumas propostas de trabalho futuro consideradas pertinentes.

Por fim, são listadas todas as referências utilizadas na dissertação, e é ainda exposto um conjunto de conteúdos adicionais distribuídos ao longo de apêndices.





## Capítulo 2

# Transporte Marítimo de Contentores

Neste capítulo são abordadas as principais componentes do transporte marítimo de contentores de forma a introduzir o leitor no tema. São definidos e caracterizados os contentores, os navios porta-contentores, quanto à sua estrutura física e quanto à sua estabilidade, e por fim o terminal portuário.

### 2.1 Contentores

Um contentor é um equipamento normalizado concebido para facilitar o transporte e a movimentação de carga quer por via terrestre quer por via marítima. Estes podem ser usados, em média, entre 10 a 15 anos, no entanto os seus tempos de vida dependem essencialmente do seu uso e das condições a que são sujeitos.

Todos os contentores utilizados para transporte internacional possuem uma placa CSC (*Container Safety Convention*), que possui informações de identificação e características de resistência, que quando cumpridas garantem altos níveis de segurança.



Figura 2.1: Exemplo de uma placa CSC (*Container Safety Convention*), [1].

Os contentores são, por norma, fabricados em aço, mas podem também ser construídos em madeira. A unidade de medida utilizada para dimensionar contentores é o

TEU (*twenty-feet equivalent unit*), sendo que 1 TEU corresponde a 20 pés, podendo esta medida ser representada na forma de 20'.

Existem vários tipos de contentores devido aos requisitos das diferentes cargas que podem transportar. Os mais comuns, designados padrão, são os contentores de 20' e 40' de comprimento, isto é, 1 e 2 TEU respetivamente (Figura 2.2). Ambos os contentores referidos, possuem 8' de largura e 8'6" de altura (8 pés e 6 polegadas). Note-se ainda que 2 TEU equivale a 1 FEU (*fourty-feet equivalent unit*).



(a) Contentor de 20' de comprimento (1 TEU).



(b) Contentor de 40' de comprimento (1 FEU).

Figura 2.2: Exemplos de contentores com as dimensões padrão, [19].

Além das suas características físicas, os contentores podem, ainda, ser diferenciados pelo seu fluxo de transporte e tipo de movimentação num porto. Neste contexto, existem 3 diferentes tipos de contentores: contentores de exportação, contentores de importação e contentores mistos. Os contentores de exportação são aqueles que entram no terminal através da portaria, seja por via rodoviária ou ferroviária, permanecendo algum tempo no parque, até serem carregados no navio porta-contentores. Já os contentores de importação chegam ao terminal por via marítima e posteriormente são colocados no parque, onde aguardam pela sua ordem de levantamento e pelo transporte terrestre que os retirará do terminal. Por fim, os contentores mistos, cujo movimento corresponde a uma mistura dos dois referidos anteriormente, chegam ao terminal por via marítima, permanecendo no parque por algum tempo e saindo do parque igualmente por via marítima.

Na Figura 2.3 é possível observar o fluxo de transporte dos três tipos de contentores acima referidos e, ainda, as diferentes áreas por onde circulam os contentores consoante

o seu tipo de movimentação no porto.

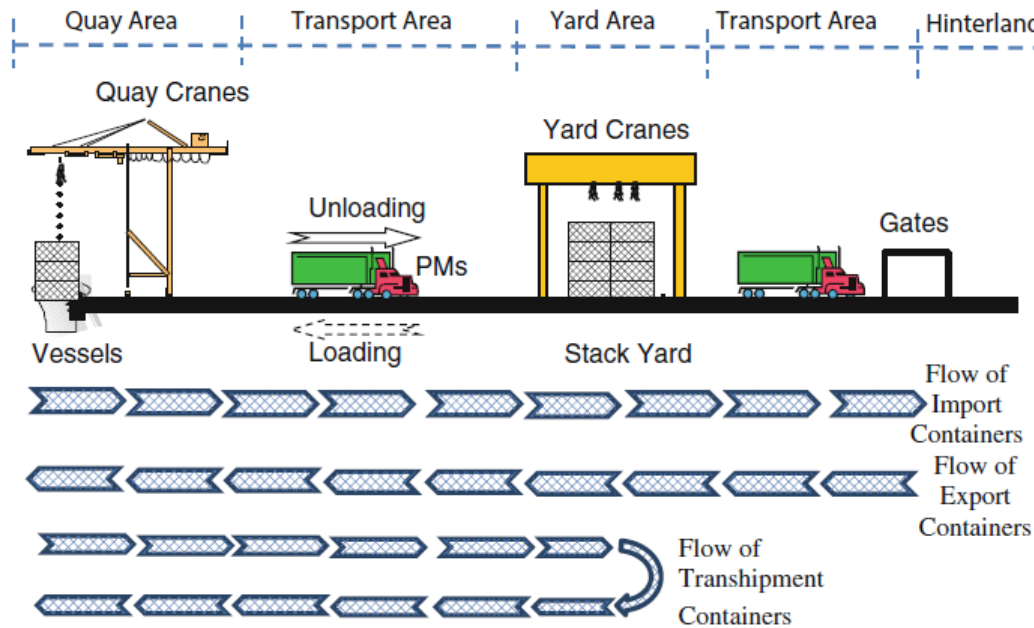


Figura 2.3: Áreas de um terminal e fluxo de transporte de contentores. Acima, da esquerda para a direita: área de cais (*quay area*) onde são manuseados os navios (*vessels*) e onde atuam os guindastes de cais (*quay cranes*), área de transporte (*transport area*) onde os contentores são levados até à próxima área de camião, área do parque (*yard area*) onde os contentores são colocados em pilhas (*stack yard*) através de guindastes referentes ao parque (*yard cranes*), novamente área de transporte e por fim área referente ao *hinterland*, onde está presente a portaria (*gates*). Abaixo, descrito através de setas: fluxo de transporte de contentores de importação (*flow of import containers*) desde a área de cais até à área referente ao *hinterland*, fluxo de transporte de contentores de exportação (*flow of export containers*) sendo este o inverso do primeiro, e fluxo de transporte de contentores mistos (*flow of transshipment containers*) que consiste numa mistura dos dois fluxos anteriores, [33].

## 2.2 Navios Porta-Contentores

### 2.2.1 Estrutura Física

Um navio porta-contentores é um navio (de agora em diante referido apenas como navio) concebido especial e exclusivamente para o transporte de carga contentorizada, logo a sua estrutura física é desenhada de forma a facilitar a movimentação de contentores.

É de notar que a capacidade de um navio pode ser mencionada de 2 formas: peso (valor máximo de TEU) e unidades (número máximo de contentores). Por norma, atinge-se o número máximo de contentores que o navio pode transportar antes de se atingir o valor máximo de TEU, sendo que o navio raramente é carregado com o seu peso máximo.

Na Tabela 2.1 são apresentados os diversos tipos de navio mais usuais no transporte contentorizado consoante a sua capacidade de carga referida em TEU.

Tipos de navios	Capacidade (TEU)
<i>Feeder</i>	100 - 499
<i>Feedmax</i>	500-999
<i>Handy</i>	1000 - 1999
<i>Sub-Panamax</i>	2000 - 2999
<i>Panamax</i>	3000 - 4500
<i>Post-Panamax</i>	>4500

Tabela 2.1: Classificação dos navios porta-contentores segundo a sua capacidade de carga, [16].

O espaço do navio onde são alocados os contentores é dividido em secções longitudinais, designadas *bays*. Por sua vez, cada *bay* está dividida em secções transversais e verticais, designadas pilhas e filas respetivamente (Figura 2.4, esquerda). É de referir que as *bays* encontram-se separadas, pela tampa de uma escotilha, em 2 secções: convés e porão. A tampa da escotilha impede que a água, a luz ou outra substância entre em contacto com o porão e permite o armazenamento de contentores no convés.

Os contentores podem ser alocados a *slots*, posições referenciadas por 3 índices: *bay*, pilha e fila. Considerando apenas os contentores mais comuns, sabe-se que em cada *slot* podem ser alocados 2 contentores de 20' de comprimento ou 1 contentor de 40' de comprimento. Alguns contentores possuem características especiais, daí existirem *slots* com algumas particularidades, como são exemplo as *slots* com tomadas elétricas que fornecem energia aos contentores que necessitam de refrigeração (Figura 2.4, direita).

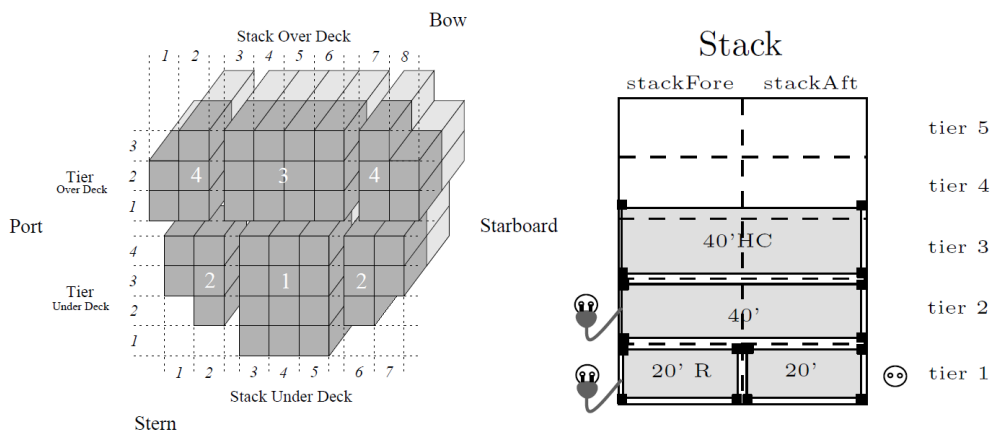


Figura 2.4: À esquerda: Vista frontal de uma *bay* dividida em duas secções: convés (*over deck*) e porão (*under deck*). À direita: Vista lateral de uma pilha, que contém *slots* com energia eléctrica situadas na base, [14].

Existe um sistema de referências no que toca ao posicionamento do contentores no navio. Segundo *Ambrosino et al.*, [5], as *bays* são identificadas no sentido longitudinal, da proa para a popa, com números ímpares quando se tratam de contentores de 20' de comprimento e com números pares quando se tratam de contentores de 40' de comprimento. É de salientar que duas *bays* adjacentes para contentores de 20' de comprimento correspondem a uma *bay* para contentores de 40' de comprimento. Assim, para os primeiros contentores mencionados têm-se as *bays* 1, 3, 5, etc., e para os outros têm-se as *bays* 4 ( $bay\ 4 = bay\ 3 + bay\ 5$ ), 8 ( $bay\ 8 = bay\ 7 + bay\ 9$ ), etc. As pilhas são referenciadas no sentido transversal, de estibordo para bombordo, onde são ímpares a estibordo e pares a bombordo. Desta forma, consideram-se as pilhas 1, 3, 5, etc. a estibordo e as pilhas 2, 4, 6, etc. a bombordo. Por fim, as filas são classificadas no sentido vertical desde a base até ao topo do porão com número pares. No convés a numeração é realizada de forma diferente, isto é, incia-se com a posição do contentor mais alta no porão e a unidade segue a contagem anterior. Então, no porão têm-se as filas 2, 4, 6, etc., e no convés as filas 82, 84, 86, etc., como se verifica na Figura 2.5.

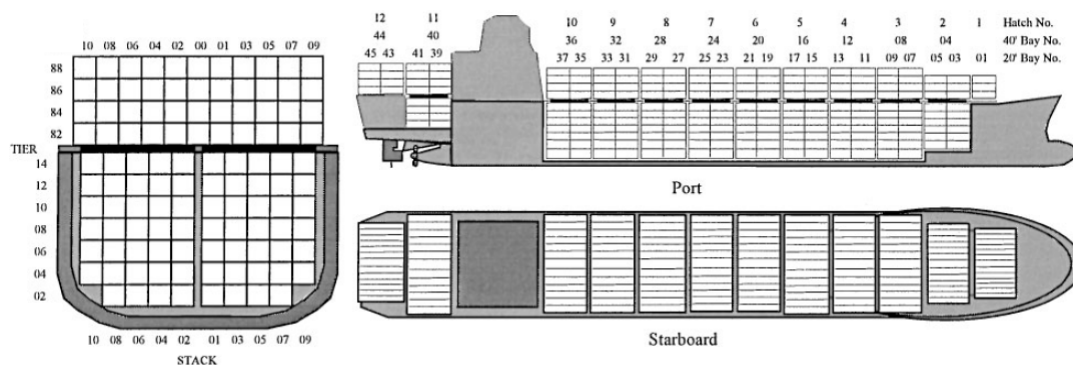


Figura 2.5: Estrutura do espaço de carga de um navio: à esquerda, num plano transversal; à direita em cima, num plano longitudinal e à direita em baixo, num plano base, [44].

### 2.2.2 Estabilidade e Força

Para um navio seguir a rota para distribuição dos contentores nele armazenados pelos diferentes portos de destino, deve apresentar valores de estabilidade razoáveis, pois caso contrário é mais provável a ocorrência de danos estruturais. Assim, se se obtiver um plano de estiva adequado, os riscos supra citados serão minimizados.

A força acima referida diz respeito à geometria do casco que quando adequada fornece parte do equilíbrio do navio, gerando resistência a condições adversas e fornecendo também características de controlabilidade.

Já "a estabilidade é a qualidade de que é dotada qualquer embarcação e que consiste em retomar à posição direita logo que cessa a força que causou a inclinação", [12].

Por norma, o responsável pelo carregamento dos contentores no navio, seja uma empresa de estiva, uma operadora ou um representante do próprio porto, tem que ter em conta os fatores acima referidos, produzindo assim um plano de estiva adequado.

### 2.3 Terminal de Contentores

Um terminal de contentores é uma secção de um porto marítimo onde os contentores são parqueados para posteriormente serem carregados e transportados por via terrestre ou marítima.

Por norma, os terminais estão divididos em duas áreas: o cais onde o navio atraca e onde acontece o processo de carga e descarga de contentores e a área terrestre que corresponde ao parque e ao *hinterland*. O parque representa a área onde os contentores são armazenados segundo certas regras até serem carregados no meio que os transportará até ao seu destino e o *hinterland* corresponde à área de comunicação entre os diversos meios de transporte que atuam no processo de armazenamento de contentores. Usualmente, a portaria por onde entram e saem os meios de transporte terrestres, como por exemplo os camiões, faz parte do *hinterland* (Figura 2.3).

É possível ainda existir uma outra área situada ao pé do navio, em alguns portos, onde os contentores são temporariamente alocados de forma a que posteriormente o seu estacionamento seja feito de forma rápida e organizada.

Os contentores podem ser movimentados dentro das áreas acima referidas e entre elas através de guias, guindastes, pórticos, empilhadores, camiões, veículos automáticos denominados *Automated Guided Vehicles (AGV)*, entre outros equipamentos (Figura 2.6).



(a) *Automated Guided Vehicle* (Porto de Hamburgo, Alemanha).



(b) Guindaste automatizado/pórtico (Porto da Antuérpia, Bélgica).



(c) Grua móvel (Porto de Diliskelesi, Turquia).

Figura 2.6: Exemplos de alguns equipamentos usados na movimentação de contentores em diferentes portos, [42].

Existe, também, a possibilidade dos contentores serem diretamente carregados e descarregados em comboios, quando o terminal tem ligação a alguma linha férrea.

Na maioria dos portos, certas atividades portuárias, como as relacionadas com a movimentação e armazenamento de contentores, estão concessionadas a empresas de estiva ou operadoras por onde passam as decisões.





## Capítulo 3

# Revisão do Estado da Arte

No presente capítulo é referida e comentada a literatura mais relevante na área abordada nesta dissertação, ou seja, é feita uma revisão bibliográfica acerca do CSP e do *layout* de parque de contentores, referindo os trabalhos já existentes e os seus resultados.

### 3.1 Container Stowage Problem (CSP)

A maioria das abordagens relativas ao CSP divide-se em duas categorias principais, as que tratam o problema completo numa única fase e as que dividem o problema principal em subproblemas, podendo estes serem tratados individualmente usando diferentes métodos.

As primeiras abordagens referidas são caracterizadas pelos modelos que introduzem variáveis para a atribuição de um contentor a uma *slot*. Inicialmente, usaram-se modelos tradicionais de programação inteira binária, no entanto estes não têm estado à altura quando se tratam de navios modernos com capacidades bastante grandes, como se constatou com *Botter e Brinati* [11], em 1992, e *Avriel et al.* [10], em 1998, por exemplo. Nas abordagens de uma só fase, a precisão dos modelos usados na resolução dos problemas era sacrificada para obter escalabilidade.

De acordo com as segundas abordagens mencionadas, o mais comum era dividir o problema em 2 fases. O problema de alocação de contentores pelas diferentes secções do navio era tratado na primeira fase. E na segunda fase, seguindo a solução gerada inicialmente, tratava-se para cada secção do navio de forma independente, o problema de alocação de contentores às *slots*. No entanto, alguns autores tais como *Ambrosino et al.* [6], em 2004, e *Gummus et al.* [18], em 2008, trataram o problema inicial num número maior de fases. É de salientar que as abordagens multifásicas garantiam tempos computacionais mais aceitáveis que as primeiras abordagens.

Note-se que, na maioria dos trabalhos mencionados abaixo, são apresentadas técnicas de apoio à decisão na resolução do CSP com o propósito de minimizar o número total de *overstows* (daqui em diante referido, apenas, como *Obj1*). Assim, quando o CSP for tratado com outra finalidade, esta será apresentada na descrição do trabalho desenvolvido pelo autor.

Em 1984, *Shields*, [40], propôs um sistema designado *Computer-Aided Preplanning System* que produzia planos de estiva recorrendo à combinação de simulação e da teoria de Monte Carlo. O modelo de *Shields* baseava-se numa abordagem de uma só fase, alocar

os contentores nas várias *slots*, e tratava o *Obj1*. Este sistema garantia resultados para navios de dimensões maiores aos que eram tratados quando produzidos planos de estiva sem ajuda computacional.

Em 1988, *Martin et al.*, [22], desenvolveram um algoritmo para resolver o *Master Bay Plan Problem*, tendo em conta restrições de estabilidade do navio e englobando contentores de refrigeração no estudo. Este algoritmo tinha como objetivo a minimização do número de movimentações das gruas durante as operações de carga/descarga, para além do *Obj1*.

Também nesse ano, *Sculi e Hui*, [38], desenvolveram um estudo onde relacionaram o número de diferentes tipos de contentores e os efeitos da distribuição destes com a eficiência da estiva. Os autores chegaram à conclusão que o principal fator que levava a movimentos de desperdício era o facto de se empilharem contentores de diferentes dimensões na mesma pilha. Assim, defenderam uma política seletiva de alocação de contentores às *slots* com a ressalva de que quando uma *slot* estivesse disponível, o contentor deveria lá ser colocado.

*Botter e Brinati*, [11], em 1992, propuseram um modelo designado *Complete Mathematical Model* capaz de gerar planos de estiva para um navio com capacidade de 740 TEU. Este modelo determinava a sequência de carregamento/descarregamento de contentores nos diversos portos e pretendia alcançar o *Obj1*. O tempo computacional para este estudo era elevado e após a complexidade do modelo ser reduzida, continuava a não ser viável.

Em 1993, *Avriel e Penn*, [8], propuseram uma heurística de nome *Whole Columns Heuristic Procedure* com a finalidade *Obj1*, mas esta não se revelou muito interessante em termos de tempo computacional. Mais tarde, em 1998, *Avriel et al.*, [10], introduziram uma heurística denominada *Suspensory Heuristic*, para um navio com capacidade entre 300 e 1700 TEU, avaliada em 300 instâncias geradas aleatoriamente, com o mesmo objetivo do trabalho anteriormente referido, não considerando restrições importantes como a estabilidade do navio. Assim, a *Suspensory Heuristic* surgiu de forma a resolver instâncias maiores. Foi também proposto pelos autores um modelo de programação linear binário que obtinha soluções ótimas para instâncias com apenas uma *bay*. Este modelo devolvia boas soluções, apresentando tempos computacionais reduzidos. Porém, o elevado número de variáveis binárias limitava o modelo e por consequência este sofreu simplificações, tornando o modelo viável apenas para problemas de dimensão reduzida.

*Ambrosino e Sciomachen*, [2], em 1998, introduziram uma formulação de satisfação de restrições capaz de gerar planos de estiva para um navio completo. Este modelo foi formulado através de diferentes métodos consoante o estado da arte, porém apenas foi usado para navios com capacidades bastante pequenas.

Em 2000, *Wilson e Roach*, [45], introduziram o primeiro modelo de composição hierárquica. O modelo gerava planos de estiva, em 90 minutos, para um navio de capacidade de 696 TEU. Um ano mais tarde, os mesmos autores [46] desenvolveram um sistema com o mesmo objetivo do trabalho anterior, que não necessitava da intervenção de qualquer pessoa. Este foi tratado em duas fases, a primeira consistia numa estratégia de colocação generalizada e a segunda num procedimento de posicionamento especializado. Os autores usaram heurísticas incorporadas nas funções objetivo de cada uma das fases e, por isso, todo este processo era obtido num tempo computacional razoável.

Ainda em 2000, *Avriel et al.*, [9], elaboraram um modelo para gerar planos de estiva com o objetivo de minimizar o custo do número total de *overstows*. Neste estudo, os

autores mostraram que este se tratava de um problema NP-completo e relacionaram-no com o *The Coloring of Circle Graphs Problem*, usando essa relação para melhorar ligeiramente o plano de estiva e obtendo assim um plano sem *overstows* num tempo computacional considerável.

Em 2002, *Dubrovsky et al.*, [15], apresentaram um algoritmo genético para tratar problemas de grandes dimensões, com as mesmas premissas que [10], e afirmaram ainda que a sua abordagem era suficientemente flexível para incluir novas restrições. Esta abordagem produziu planos de estiva para problemas gerados aleatoriamente de cerca de 1000 TEU, em 30 minutos (tempo computacionalmente aceitável).

Nesse ano, *Kang e Kim*, [23], propuseram uma abordagem de decomposição semelhante à de [46] que melhorava iterativamente a qualidade do plano de estiva. De acordo com os resultados computacionais, em cerca de 11 minutos, os autores resolveram instâncias aleatórias de até 4000 TEU.

Em 2004, *Ambrosino et al.*, [6], propuseram um método de 3 fases para a resolução do problema *The Master Bay Plan Problem*, tendo em conta um conjunto de restrições estruturais e operacionais. Neste trabalho, o objetivo dos autores era minimizar o tempo de estiva.

*Giemsch*, [17], em 2004, apresentou heurísticas onde era aplicada matemática discreta nas operações de pesquisa. *Giemsch* estudou alguns casos com o objetivo de classificar e alterar o planeamento de estiva, apontando características relevantes nesta área, a fim de estimular a discussão de métodos de solução avançados.

Em 2005, *Wei-ying et al.*, [43], dividiram o problema de armazenamento de contentores no navio em 2 subproblemas, a fim de reduzir a complexidade computacional, quando considerados vários portos de destino. Inicialmente, o principal problema é considerado como um *Bin Packing Problem*, onde são tratados os contentores com características homogêneas. Um dos objetivos nesta primeira fase era o *Obj1*. Na segunda fase, os contentores são alocados especificamente de forma a respeitar restrições de altura e a regra LIFO (*Last In - First Out*). Os autores focaram-se principalmente no primeiro subproblema, usando o algoritmo Tabu na heurística de busca desenvolvida.

Em 2006 e com continuação em 2009, *Ambrosino et al.*, [7] e [3], propuseram uma heurística trifásica com o objetivo do seu trabalho anterior, [6]. Na primeira fase do processo, os autores elaboraram um algoritmo de pesquisa em árvore, onde eram atribuídos contentores a *bays*, enquanto na segunda utilizaram um algoritmo de trocas baseado em técnicas de pesquisa local, de forma a melhorar a solução obtida na fase inicial. Após tratar as duas primeiras fases da decomposição, a terceira fase pós-otimizava o plano de estiva a fim de melhorar as condições de estabilidade do navio. Os autores usaram casos de teste reais, conseguindo obter bons desempenhos em termos de qualidade de solução e tempo computacional. Mais concretamente, foram tratados dois navios de 198 e 2124 TEU de capacidade em 24.5 e 74.7 segundos, respetivamente.

*Imai et al.*, [21], em 2006, estudaram o problema de planeamento de estiva, considerando a estabilidade do navio e tendo como propósito o *Obj1*. O problema foi definido como um problema de programação inteira multiobjetivo, onde se usou o método da ponderação e, assim, foram obtidas soluções em tempo computacional aceitável quando não existiam *overstows* no processo de descarga. Porém, quando era aplicado o algoritmo genético na busca de uma solução melhor, o tempo computacional tornava-se inaceitável.

Em 2008, *Gummus et al.*, [18], introduziram uma abordagem de decomposição de 4 fases, que os autores alegavam ser escalável para instâncias de quase qualquer tamanho

e modular, pois a saída da primeira fase era utilizada como entrada da segunda fase e assim sucessivamente. As várias fases consideravam o *Obj1*, em situações em que existissem *overstows* e ainda era abordada a eficiência dos guindastes na primeira fase. É de notar que nesta decomposição, eram adicionados novos elementos em cada fase ao plano de estiva, o que facilitava a determinação do elemento que tornava o problema mais complexo num instância em concreto. Os autores conseguiram bons resultados computacionais com esta abordagem quando usados problemas reais.

Ainda nesse ano, *Zhang et al.*, [49], elaboraram uma lista de características importantes na resolução do problema de armazenamento de contentores no navio. Alegaram que deve ser tido em conta o número de contentores e as suas características físicas, tal como o seu porto de destino e a sua posição no parque. Para além disso, deviam ser consideradas as características da estrutura física e estabilidade do navio e por fim, deviam ser tidos em conta os custos da movimentação de contentores.

Em 2009, *Ambrosino et al.*, [3], propuseram um modelo que tinha como objetivo minimizar o tempo de carga/descarga dos contentores no navio. Para este trabalho, foram considerados contentores de 20' e 40', com o mesmo porto de destino, e foram distribuídos nas pilhas de acordo com os seus pesos. O modelo tratava navios de capacidade de 198 a 2124 TEU, onde a *bay* de maior dimensão tem capacidade de 20 e 120 TEU respetivamente. Mais tarde, em 2010, *Ambrosino et al.*, [4], introduziram duas heurísticas para gerar planos de estiva. A primeira consistia numa heurística construtiva, seguindo as regras de [3] enquanto a segunda consistia num modelo de otimização de colónia de formigas. Esta última tratava um navio de capacidade de 5632 TEU em 139.4 segundos, em média.

Finalmente nesse ano, *Yoke et al.*, [47], introduziram um sistema automático composto por 3 módulos, nomeadamente o módulo que gerava planos de estiva, o módulo de segurança e estabilidade e ainda o módulo de otimização. O trabalho referido foca-se na geração de planos de estiva para navios de grandes dimensões. Para obter resultados de problemas reais, foi usado um navio de capacidade de 5000 TEU. Os autores demonstraram que este sistema tinha capacidade de gerar de forma eficiente um plano de estiva viável com um reduzido número de *overstows*, quando comparado aos planos criados sem ajuda computacional. No entanto, neste estudo ainda não tinham sido consideradas as restrições de estabilidade.

Ainda em 2009, *Chou e Ding*, [13], elaboraram uma heurística para o problema de armazenamento de contentores com o *Obj1*. Esta surgiu para tratar problemas com navios de capacidades elevadas e maior número de portos de destino. Tendo em conta os tempos computacionais, a heurística em causa era considerado mais eficiente que a heurística descrita em [10].

Em 2010, *Liu et al.*, [34], desenvolveram um sistema para o transporte de contentores marítimos, designado PROFITS (*Profit Optimization for Internacional Transportation Service*). Este sistema é composto por 6 módulos, nomeadamente a previsão da procura, o planeamento de estiva, a otimização da linha de transporte, a atribuição de preços, a distribuição de contentores e uma análise de contributo. Porém, os autores focaram-se nos 3 primeiros módulos mencionados. O sistema constrói modelos problemáticos e estes são tratados usando alguns métodos de suporte tais como suavização exponencial, análise de regressão, programação linear, algoritmo genético, entre outros. Foi provado através de exemplos reais, que este sistema é uma ferramenta eficaz e confiável.

Em 2013, *Moura, Oliveira e Pimentel*, [35], desenvolveram um modelo de programação

inteira mista, para resolver o problema de distribuição marítima de curta distância, onde o CSP se integrou no problema de roteamento de navios. Este trabalho tinha como objetivo a minimização do custo da rota, este custo englobava o custo de navegação do navio, o custo de atracação do navio num porto, o custo associado à movimentação de um contentor durante o processo de descarga e ainda o custo da utilização do navio desde o porto inicial até ao porto final. No estudo foram considerados contentores de refrigeração, prazos de entrega dos pedidos e, também, regras de estabilidade do navio. Os autores afirmaram que o tempo até obter uma solução ótima dependia do número de portos de destino e do número de navios, bem como do tipo de exigências de distribuição dos contentores e dos prazos de entrega dos mesmos. E ainda constataram que, na maioria dos casos, o modelo devolvia soluções ótimas num curto tempo computacional.

### 3.2 Layout de Parques de Contentores

Em 1993, *Ibrahimi et al.*, [20], estudaram várias estratégias de movimentação e arrumação de contentores de exportação nos terminais, úteis para o planeamento a longo prazo e com o objetivo de minimizar a quantidade de trabalho num terminal, clarificando assim a relação de causa-efeito entre os horários dos navios e as decisões de gestão do espaço. Os resultados dependiam do número de contentores que eram descarregados de cada navio e da distribuição do tempo de chegada dos contentores em relação às partidas dos navios. Os autores confirmaram, segundo vários testes, que as estratégias por eles desenvolvidas eram eficazes, identificando soluções ótimas ou quase ideais.

Em 1995, *Shen e Khoong*, [39], apresentaram uma ferramenta de apoio, desenvolvida em *Excel*, a um problema de planeamento de larga escala relativo à distribuição de contentores vazios em vários períodos. Os resultados obtidos neste trabalho levaram a concluir que, em certas circunstâncias, os contentores vazios deviam ser armazenados em locais diferentes dos contentores com carga, visto que poderiam sofrer operações extra, o que se traduziria em mais custos.

*Kim*, [24], em 1997, investigou diversas configurações de empilhamento de contentores com a finalidade de minimizar o número de movimentos de manuseamento de um qualquer contentor e, ainda, de todos os contentores de uma *bay*, desenvolvendo um programa computacional nesse sentido. Assim, foi elaborado um conjunto de tabelas e equações utilizados na estimação do número de movimentos e, embora o tempo computacional não fosse significativo para *Kim*, este propôs equações de regressão para obter facilmente as estimativas.

Mais tarde, em 1998, *Kim e Bae*, [25], apresentaram uma metodologia para converter o *layout* de uma *bay* usado na prática para um *layout* desejável, movendo assim o menor número de contentores na menor distância possível. Este problema foi dividido em 3 subproblemas, nomeadamente: a correspondência de *bays* que consistia em atribuir uma *bay* específica à configuração das *bays* do layout praticado na realidade, o planeamento do movimento, onde era determinado o número de contentores a serem movidos de uma *slot* para outra, e a fase de sequenciamento de tarefas, onde era minimizado o tempo do processo de formação de novas composições de *bays*. Note-se que os 2 primeiros subproblemas mencionados eram resolvidos em simultâneo, usando programação dinâmica. Já o último subproblema referido era resolvido através da técnica do problema de transporte. Para resolver cada subproblema, era necessário um elevado tempo computacional, no

entanto o último subproblema mencionado era o que dispndia de mais tempo.

No mesmo ano, *Kim e Kim*, [26], propuseram um modelo que pretendia determinar o espaço de armazenamento ideal para contentores de importação e o número de guindastes de transferência, minimizando assim o custo do espaço, o custo dos guindastes de transferência e o custo relacionado com o tempo gasto para a transferência de contentores. Os autores mostraram que o espaço ideal para armazenamento diminuía com o aumento do custo de espaço, mas este em nada interferia no número ótimo de guindastes. No entanto, o aumento do custo relacionado com o transporte dos contentores, nomeadamente o custo dos camiões, aumentava tanto o número ótimo de guindastes como o espaço ideal de armazenamento.

*Kim e Kim*, [27], em 1999, basearam-se numa estratégia de segregação. Os autores relacionaram a altura de uma pilha com o número de movimentos de desperdício, isto é, os movimentos de realocação dos contentores durante o processo de carregamento do navio, considerando contentores de importação e tendo em conta casos em que a taxa de chegada dos contentores de importação era constante ou cíclica ou, ainda, dinâmica. Com base na técnica de relaxamento de *Lagrange*, os autores sugeriram metodologias para a resolução de cada caso mencionado.

Em 2000, *Kim et al.*, [32], apresentaram um modelo de programação dinâmica para determinar o posicionamento dos contentores de exportação num parque, tendo em conta o seu peso. Este trabalho tinha como finalidade a minimização de movimentos de desperdício. Os autores afirmaram que estes movimentos aconteciam quando contentores mais leves eram empilhados sobre contentores mais pesados, visto os contentores mais pesados serem carregados primeiramente no navio.

Em 2002, *Kim e Kim*, [28], propuseram um modelo com as mesmas premissas que apresentaram em [26], porém neste trabalho foram estudados 2 casos: um em que é minimizado o custo das operações realizadas no terminal do ponto de vista do operador, através de um modelo determinista, e outro onde é minimizado o custo das operações realizadas no terminal do ponto de vista do operador e dos clientes, através de um modelo estocástico. Os resultados obtidos foram semelhantes aos obtidos em [26].

*Kim e Park*, [30], em 2003, desenvolveram um modelo de programação inteira mista com o propósito de maximizar a eficiência das operações de alocação de contentores de exportação num parque. Foram usados dois algoritmos, um com base no tempo de estadia dos contentores no parque e outro com base na técnica de otimização de subgradiente, versão relaxada do modelo inicial. Verificou-se que os dois algoritmos apresentavam soluções quase idênticas, no entanto o segundo algoritmo mencionado era computacionalmente mais demorado que o primeiro.

Ainda nesse ano, *Zhang et al.*, [48], trabalharam no problema de alocação de contentores num parque, no entanto consideraram um caso complexo, ou seja, o caso em que os 3 tipos de contentores, de exportação, de importação e mistos, são arrumados nos mesmos blocos do parque. Para tal, o problema original foi dividindo em 2 subproblemas, o primeiro tinha como objetivo equilibrar as cargas de trabalho entre os blocos, em cada período de tempo, evitando congestionamento nas operações dos terminais, e o segundo pretendia minimizar a distância percorrida quando transportados os contentores entre os blocos e os locais de atracação do navio. Este método reduzia bastante o desequilíbrio de carga de trabalho no parque, num curto tempo computacional.

Em 2008, *Kim et al.*, [31], sugeriram um método para definir o layout de parques de contentores, onde era apresentado o esboço do parque e os números de corredores verticais

e horizontais. Foram considerados 2 tipos de layout: um onde os blocos eram dispostos paralelamente ao cais e outro onde os blocos eram dispostos perpendicularmente ao cais. O trabalho de *Kim et al.* considerava como objetivo a minimização dos custos de viagem dos transportes e da deslocalização dos guindastes. Foram usados dados reais para avaliar o estudo e verificou-se que os custos a serem minimizados eram menores na disposição paralela dos blocos ao cais. Note-se que os autores consideraram a forma do parque como sendo retangular.

Mais tarde, em 2013, *Kim e Lee*, [29], propuseram um método para determinar *layouts* ideais, com o objectivo de minimizar o custo de construção do chão do parque, o custo fixo de sobrecarga e funcionamento dos guindastes e o custo de funcionamento dos transportes. Os autores trabalharam com os mesmos tipos de *layout* considerados em [31], estes foram comparados entre si e os resultados deste trabalho foram comparados com um *layout* praticado na realidade. Verificou-se que usando o *layout* ótimo obtido neste trabalho se obtiveram custos significativamente mais reduzidos do que com o *layout* real. Em relação à disposição paralela, constatou-se que o *layout* ótimo apresentava um número maior de pilhas e um número menor de filas em relação ao *layout* real, enquanto que a disposição perpendicular, mostrou que o *layout* ótimo apresentava blocos mais curtos e mais largos que um *layout* na prática.





## Capítulo 4

# Caso de Estudo

O caso de estudo apresentado neste capítulo é proposto pelo terminal do porto da Figueira da Foz.

Primeiramente, é dado a conhecer o porto da Figueira da Foz, descrevendo as várias áreas em que este se divide e quais as suas principais operações. De seguida, é apresentada a operadora encarregue da movimentação e arrumação de contentores neste porto e são apresentados os procedimentos atuais dessas operações.

É também descrito o problema a estudar, indicando todos os dados relevantes na resolução do CSP, e posteriormente apresentado o modelo matemático para o mesmo.

São ainda caracterizadas as diversas instâncias que serão usadas, no seguinte capítulo, na validação do modelo.

E, finalmente, é apresentada a solução proposta para a redefinição do layout do parque, uma vez que a eficiência no estacionamento dos contentores é o primeiro passo para a obtenção de ótimos resultados no que diz respeito ao número de *overstows* obtidos no processo de descarga de um navio.

### 4.1 Porto da Figueira da Foz

O Porto da Figueira da Foz situa-se, como o próprio nome indica, na cidade da Figueira da Foz, no distrito de Coimbra. Este é um porto vocacionado para o transporte marítimo de curta distância e, perante a sua posição geográfica, verifica-se uma importância estratégica e económica acrescida.

No que diz respeito aos acessos, este porto oferece condições de regalia, uma vez que, para além dos acessos rodoviários, apresenta uma ligação férrea à rede nacional e à rede de Espanha.

Quanto às instalações, este porto dispõe de diversas áreas, tais como (Figura 4.1):

- ▷ Marina/Doca de recreio, direccionada para a recepção e acostagem de embarcações de recreio náutico e marítimo-turístico;
- ▷ Terminal de carga geral, local onde são movimentadas diversas mercadorias, tais como pasta de papel, vidro a granel, madeira, argilas, entre outros;
- ▷ Terminal de granéis sólidos, vocacionado principalmente para a movimentação de contentores;
- ▷ Terminal de recepção de produtos betuminosos, que se destina à movimentação de granéis líquidos, atualmente do tipo betuminosos, e havendo a possibilidade de futura-

mente movimentar e armazenar combustíveis;

▷ Doca dos bacalhoeiros, que corresponde à localização de dois estaleiros e de diversas atividades industriais relacionadas com a pesca e com a construção de infraestruturas portuárias;

▷ Porto de pesca costeira, vocacionado para as várias atividades relacionadas com o setor de pesca, tais como, descarga do pescado e a sua armazenagem, processamento e comercialização.

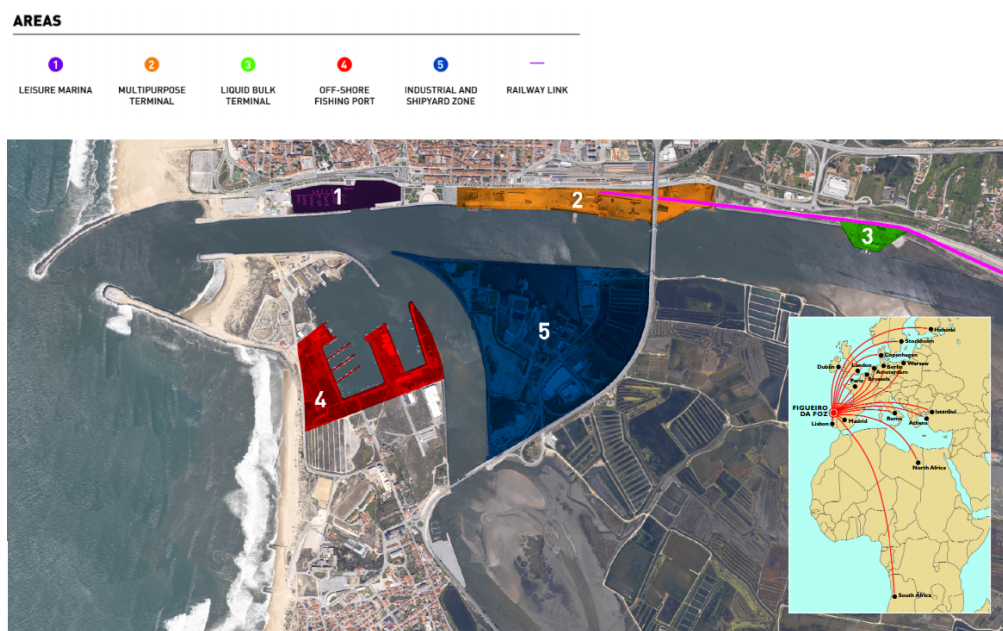


Figura 4.1: À esquerda: Mapa do porto da Figueira da Foz delimitado por áreas: marina/doca de recreio (1), terminal multiusos (terminal de carga geral e terminal de graneis sólidos) (2), terminal de graneis líquidos (3), porto de pesca costeira (4), zona industrial e estaleiros (5) e a representar a linha ferroviária está a linha rosa. À direita: Ligações entre o porto da Figueira da Foz e outros no que diz respeito ao transporte de mercadorias, [37].

A atividade portuária referente à movimentação de contentores e arrumação dos mesmos no terminal do porto em causa está a cargo de uma operadora denominada *Liscont*, referenciada na área desde 1984. De seguida, descrever-se-á então a operadora, particularizando as suas especificidades procedimentais e operacionais.

## 4.2 Descrição do Problema

A *Liscont* dispõe de alguns equipamentos para manusear os contentores no terminal, nomeadamente uma grua móvel com capacidade até 68 toneladas e vários empilhadores para operação horizontal com capacidades máximas que variam de 4 a 42 toneladas (Figura 4.2). Sabe-se que são carregados no navio cerca de 17 contentores por hora com a grua móvel. É ainda importante referir que esta operadora apenas trabalha com contentores de dimensões padrão (Figura 2.2).



(a) Empilhador.



(b) Grua móvel.

Figura 4.2: Equipamentos usados pela operadora Liscont na movimentação de contentores.

Salienta-se que o único navio presente no processo de movimentação de contentores no porto da Figueira da Foz é o navio *Wec Brueghel* (Figura 4.3). Este é um navio do tipo *Post-Panamax* (Tabela 2.1), uma vez que a sua capacidade de carga é de aproximadamente 3600 toneladas, isto é, 5600 TEU, que corresponde a 140 contentores de 40' de comprimento.



Figura 4.3: Navio porta-contentores *Wec Brueghel* [36].

Estruturalmente, este navio apresenta 14 *bays* para contentores de 20' de comprimento. Note-se que, como referido na Secção 2.2.2, existe uma regra de forma a que o navio se mantenha equilibrado quer a bombordo/estibordo, quer a proa/ré durante o processo de carga e para que percorra a sua rota de forma estável. Assim, no navio acima referido podem ser empilhados até 5 contentores.

É de salientar que o empilhamento dos contentores segue a regra LIFO, ou seja, o último contentor a ser colocado na pilha, é o primeiro a ser retirado.

Para além da regra acima referida, há a regra nº 1, que consiste em alocar os contentores com maior peso na base do navio, por motivos de estabilidade. Verifica-se ainda

que os contentores são organizados consoante o seu porto de destino de forma a que, no primeiro porto a ser visitado, os contentores não sejam bloqueados por outros e assim sucessivamente, visando minimizar o número de *overstows*.

Os contentores transportados pelo navio *Wec Brueghel* têm apenas 2 portos de destino, designadamente, por ordem de visita, o porto de Leixões, em Portugal, onde os contentores são distribuídos por outros navios que têm como destino portos do norte da Europa, e o porto de Casablanca, em Marrocos.

O parque situado no terminal onde são armazenados os contentores possui uma área de  $20000m^2$  (100m de largura e 200m de comprimento), podendo conter 1200 TEU (Figura 4.4, (b)). A principal estratégia de arrumação consiste em dispor os contentores por grupos de acordo com o seu peso. São então distinguidos 3 grupos: contentores com peso abaixo de 25 toneladas, entre 25 e 35 toneladas e, por fim, acima de 35 toneladas. No entanto, não existe qualquer risco caso seja colocado um contentor vazio sob um carregado. Quanto à altura máxima de cada pilha no parque, esta é de 3 contentores.

Note-se que os grupos anteriormente mencionados são, na prática, representados por blocos perpendiculares ao cais, onde dentro de cada bloco os contentores são dispostos na horizontal, tendo também o cais como referência.

Existem ainda corredores para que os equipamentos possam circular e movimentar os contentores, em segurança.

É de frisar que os contentores, antes de serem carregados ou após serem descarregados, são arrumados temporariamente numa área junto à zona de atracação do navio de forma a que sua arrumação seja eficaz, isto é, seja realizada rápida e organizadamente, quando alocados no navio ou quando transportados para o parque (Figura 4.4, (a)). No processo de carga dos contentores no navio, é enviada pelo responsável do mesmo uma guia de remessa onde são descritas as características dos contentores transportados, como o peso por exemplo, o que torna mais fácil a organização na área acima referida.

O principal cliente a usar os serviços oferecidos pela *Liscont* referentes aos contentores é o grupo *The Navigator Company* (novo nome do grupo Portucel Soporcel), líder europeu na produção de pasta branqueada de eucalipto, sendo esta a mercadoria exportada. Existe um complexo industrial situado na cidade da Figueira da Foz a cerca de 10 km do terminal de granéis sólidos, que dispõe de camiões (Figura 4.5) para o transporte dos contentores do complexo até ao terminal e vice-versa.

Desta forma, os contentores de exportação chegam, do complexo industrial, ao terminal através da portaria, em camiões como já referido, permanecendo alguns dias em parque, até que chegue o navio, no qual serão carregados. Já os contentores de importação chegam ao terminal por via marítima, onde são descarregados do navio. Usualmente, estes contentores chegam vazios e são posteriormente arrumados no parque, onde aguardam pela sua ordem de levantamento e pelo camião que os retirará do terminal e os transportará até ao complexo industrial novamente.

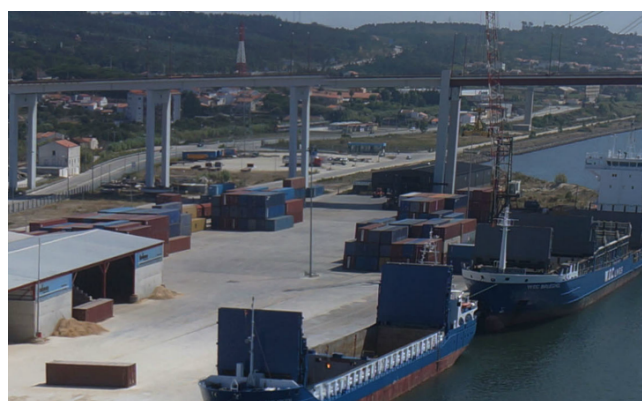
Por norma, o navio *Wec Brueghel* chega ao porto da Figueira da Foz à quinta-feira, todas as semanas. Assim, nos restantes dias da semana, os contentores são transportados para o complexo industrial e a mercadoria a exportar é contentorizada e transportada novamente para o terminal, onde fica parqueada a aguardar pela chegada do navio. Portanto, o prazo de entrega da mercadoria é de 5 dias, uma vez que durante o fim-de-semana as operações no terminal de granéis sólidos ficam estagnadas.

Apesar de se ter a informação acima referida, neste trabalho não serão tidos em conta os prazos de entrega, visto que estes são iguais para qualquer porto de destino.





(a) Descarregamento de contentores do *Wec Brueghel* e armazenamento temporário na área junto à zona de atracação do navio.



(b) Vista aérea sobre o terminal de granéis sólidos do porto da Figueira da Foz, onde é visível, à esquerda, o parque onde são armazenados os contentores, [41].

Figura 4.4: Disposição das áreas referentes à movimentação de contentores no terminal do porto da Figueira da Foz.

Até ao momento, nunca se verificou congestionamento de veículos de transporte no terminal, visto que, em primeiro lugar, a afluência de contentores no porto não é elevada e, segundo, porque os camiões são enviados em diferentes horários. Porém, residem algumas limitações, uma delas é o facto de só existir uma grua móvel, o que se torna um problema na eventualidade de alguma avaria. No porto em questão, registou-se somente um caso destes e, para solucionar o problema, a operadora transportou todos os contentores em camiões até ao porto de Leixões, sendo distribuídos por outros navios nesse porto. A pessoa responsável pela operadora *Liscont* no porto da Figueira da Foz afirma que a construção de um pórtico (como o da Figura 2.6, (b)) seria uma solução para esta limitação se a movimentação de contentores no porto fosse intensa, pois esta infraestrutura tem custos muitíssimo elevados, assim, por agora, esta solução é posta de parte.



Figura 4.5: Camião usado no transporte dos contentores entre o complexo industrial do grupo *The Navigator Company* situado na Figueira da Foz e o terminal de granéis sólidos do porto da Figueira da Foz.

Resta referir que o layout do parque de contentores está severamente ligado ao tempo de estiva dos navios. As estratégias acima descritas são as praticadas pela operadora Liscont, apesar de aceitáveis poderão não ser as melhores, sendo possível apresentar melhorias procedimentais e operacionais.

### 4.3 Formulação Matemática Para o CSP

É de salientar que a formulação matemática apresentada neste subcapítulo segue certas ideias do modelo apresentado em [35] (Secção 3.1), adicionando outras restrições importantes para o CSP e tendo em conta as características do problema mencionadas na Secção 4.2.

Considerem-se, então, os seguintes conjuntos que serão utilizados na formulação proposta para o CSP:

$P$ , o conjuntos dos portos de destino, onde  $P = \{1, \dots, p\}$ ;

$B$ , o conjuntos das *bays*, onde  $B = \{1, \dots, b\}$ ;

$C$ , o conjuntos das filas (em inglês, designadas por *cells*, daí a nomenclatura), onde  $C = \{1, \dots, c\}$ ,

$S$ , o conjuntos das pilhas (em inglês, designadas por *stacks*, daí a nomenclatura), onde  $S = \{1, \dots, s\}$ .

Cada porto marítimo apresenta uma procura, caracterizada por dois parâmetros que se conhecem à partida:  $dt_i$  e  $df_i$  que representam, respetivamente, o número de contentores de 20' e 40' de comprimento referentes à procura do porto  $i$ .

No modelo são, também, incluídas várias variáveis de decisão, que serão designadas abaixo.

As variáveis  $t_{ibcs}$  indicam se a uma *slot* são alocados 2 ou 1 contentor de 20' de

comprimento ou, ainda, se não é colocado algum contentor nessa *slot*, logo tem-se:

$$t_{ibcs} = \begin{cases} 2 & , \text{ se à } slot (b, c, s) \text{ são alocados 2 contentores de 20' de comprimento} \\ & \text{com destino ao porto i.} \\ 1 & , \text{ se à } slot (b, c, s) \text{ é alocado 1 contentor de 20' de comprimento com} \\ & \text{destino ao porto i.} \\ 0 & , \text{ se à } slot (b, c, s) \text{ não é alocado nenhum contentor com} \\ & \text{destino ao porto i.} \end{cases}$$

Já as variáveis  $f_{ibcs}$  indicam se a uma certa *slot* é alocado ou não 1 contentor de 40' de comprimento, obtendo-se:

$$f_{ibcs} = \begin{cases} 1 & , \text{ se à } slot (b, c, s) \text{ é alocado 1 contentor de 40' de comprimento com} \\ & \text{destino ao porto i.} \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

Tendo em consideração que as *bays* não são regulares, é considerado um outro conjunto de variáveis binárias,  $Mpos_{bcs}$ , que representam a matriz de posições relativa às *slots* do navio. Estas indicam se uma *slot* existe ou não no navio. Então, tem-se:

$$Mpos_{bcs} = \begin{cases} 1 & , \text{ se a } slot (b, c, s) \text{ não é uma } slot \text{ do navio.} \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

Por fim, têm-se as variáveis binárias  $\theta_{bcs}$  que indicam se ocorre ou não *overstow* numa determinada *slot*, daí:

$$\theta_{bcs} = \begin{cases} 1 & , \text{ se há } overstow \text{ na } slot (b, c, s) \text{ do navio.} \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

Desta forma, apresenta-se, de seguida, a formulação matemática completa para o CSP.

$$\min \sum_{b \in B} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} \theta_{bcs} \quad (4.1)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{b \in B} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} t_{ibcs} = dt_i, \quad \forall i \in P \quad (4.2)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} f_{ibcs} = df_i, \quad \forall i \in P \quad (4.3)$$

$$t_{ibcs} + 2Mpos_{bcs} \leq 2, \quad \forall i \in P, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (4.4)$$

$$f_{ibcs} + Mpos_{bcs} \leq 1, \quad \forall i \in P, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (4.5)$$

$$\sum_{i \in P} t_{ibcs} + 2f_{ibcs} \leq 2, \quad \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} 2f_{2bcs} + t_{2bcs} + 2f_{1bca} + t_{1bca} \\ \leq 2(1 + \theta_{bcs}), \\ \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} \sum_{i \in P} t_{ibcs} + 2f_{ibcs} + 2Mpos_{bcs} \\ \leq \sum_{i \in P} t_{ibca} + 2f_{ibca} + 2Mpos_{bca}, \\ \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\theta_{bcs} \in \{0, 1\}, \quad \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (4.9)$$

$$t_{ibcs} \in \{0, 1, 2\}, \quad \forall i \in P, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (4.10)$$

$$f_{ibcs} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in P, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (4.11)$$

$$Mpos_{bcs} \in \{0, 1\}, \quad \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (4.12)$$

A função objetivo (4.1) tem como finalidade minimizar o número total de *overtows*, portanto são percorridas todas as *slots* verificando se nalguma ocorre a situação anteriormente referida.

As restrições (4.2) e (4.3) garantem que as procuras referentes a cada porto são satisfeitas, isto significa que todos os contentores com destino a um certo porto têm que estar alocados em alguma *slot* do navio.

As restrições (4.4), (4.5) e (4.6) estão relacionadas com as posições dos contentores no navio. Assim, estas restrições garantem que, em cada *slot* do navio, sejam alocados até dois contentores de 20' de comprimento ou um contentor de 40' de comprimento ou ainda nenhum contentor. Este conjunto de restrições juntamente com as restrições (4.8) garantem a estabilidade dos contentores no navio.

Por sua vez, as restrições (4.7) verificam se numa determinada *slot* existe *overstow*, ou seja, estas restrições averiguam se quando um certo contentor, que está alocado numa qualquer *slot*, é descarregado no seu porto de destino existe sobre ele outro contentor que não irá ser descarregado nesse mesmo porto, estando assim a bloqueá-lo.

As restrições (4.8) garantem que os contentores são totalmente suportados, isto é, garantem que não pode ser alocado um contentor numa certa *slot* se a *slot* abaixo estiver vazia ou não totalmente preenchida.



Finalmente, as restrições (4.9) a (4.12) referem-se ao domínio das variáveis de decisão existentes nesta formulação, isto é, aos valores que as variáveis mencionadas podem tomar.

#### 4.3.1 Caracterização das Instâncias Para o CSP

Primeiramente, é de grande importância referir que certos parâmetros não podem ser variados devido a uma série de exigências presentes no problema.

Uma delas é a existência de um único navio a atracar no porto da Figueira da Foz no que diz respeito à movimentação de contentores, o *Wec Brueghel*, portanto é impossível variar o número de navios, tendo a formulação sido construída nesse sentido.

Sabe-se, também, que o navio *Wec Brueghel* dispõe de 14 *bays* para contentores de 20' de comprimento, isto é, 7 *bays* quando falados em contentores de 40' de comprimento. Desta forma, o número de *bays* para todas as instâncias é de 7, devido à forma como as variáveis de decisão presentes no modelo anteriormente apresentado foram criadas.

Também, o número de pilhas e filas é fixo. Quanto às pilhas, isto acontece, pois apenas podem ser empilhados até 5 contentores, estando estes carregados com mercadoria, e sabe-se à partida que todos os contentores carregados no navio não vão vazios. Quanto às filas, uma vez que o navio *Wec Brueghel* tem de largura, um máximo, de 7 filas, este é o valor a fixar para este último parâmetro (Tabela 4.1).

Parâmetro	Valor Fixo
<i>Bays</i>	7
Pilhas	5
Filas	7

Tabela 4.1: Valor fixado para certos parâmetros de entrada da formulação do CSP.

Note-se que, uma vez que as *bays* do navio não são regulares, o número de *slots* disponíveis para alocar contentores não é 245 ( $N.^o$  de *bays*  $\times$   $N.^o$  de filas  $\times$   $N.^o$  de pilhas), mas sim 182, considerando contentores de 40' de comprimento. Esta informação pode ser confirmada observando a Figura 4.6, onde está representada a estrutura de cada *bay* do navio.

Para além do caso em estudo no porto da Figueira da Foz, em que são considerados 2 portos de destino, irão ser estudados dois outros casos, considerando 5 e 10 portos de destino, de forma a obter resultados mais consistentes no que diz respeito ao estudo do tempo computacional em função do número de portos. Relativamente ao primeiro caso mencionado, é representado pelo número 1 o porto de Leixões, que é o primeiro porto a ser visitado e servido, e pelo número 2 o porto de Casablanca. Nos restantes dois casos, os portos de destino são também representados por números, no entanto não são considerados portos em concreto.

Desta forma, é necessário alterar as restrições (4.7) apresentadas na Secção 4.3, visto que estas foram criadas para o caso em que são considerados 2 portos. Para os casos em que se consideram 5 e 10 portos, as restrições (4.7) são então substituídas pelas seguintes:

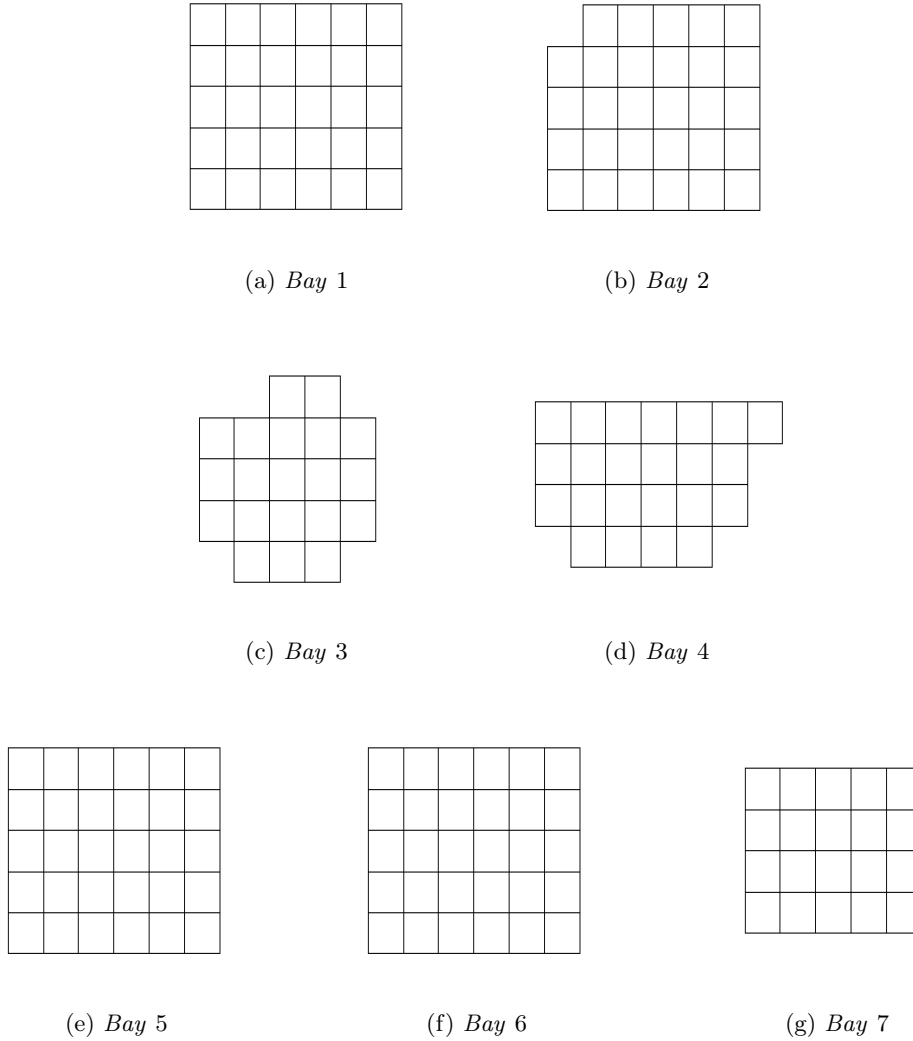


Figura 4.6: Vista frontal das *bays* do navio *Wec Brueghel*.

$$2f_{ibcs} + t_{ibcs} + \sum_{k=1}^{i-1} (2f_{kbca} + t_{kbca}) \leq 2(1 + \theta_{bcs}),$$

$$\forall i \in P, \forall b \in B, \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \quad (4.13)$$

No fundo, estas novas restrições podem integrar a formulação apresentada para o caso com 2 portos, no entanto de forma a simplificá-la, não se opta por essa possibilidade. Assim, as restrições (4.7) são generalizadas pelas restrições (4.13).

As instâncias são criadas variando somente os parâmetros relativos à procura de cada porto de destino (Tabelas A.3 a A.56, apresentadas nas Secções A.4, A.5 e A.6).

Nos três casos, nas instâncias 1 a 9 é considerada a média de contentores exportados por semana desde Janeiro a Novembro de 2014, que é de 113 contentores (arredondado às

unidades), visto que durante o período referido existiram 48 semanas (Secção A.3). Assim, a soma das procuras de todos os portos de destino não ultrapassa os 113 contentores (de 40' de comprimento).

Já na outra metade das instâncias é considerado o número de *slots* do navio *Wec Brueghel*, portanto nestes casos a soma das procuras de todos os portos de destino atinge a capacidade máxima do navio, que traduzido em número de contentores (de 40' de comprimento) é de 182.

#### 4.4 Solução Proposta Para a Redefinição do Layout do Parque de Contentores

Como já dito na Secção 1.1, a arrumação de contentores em parques assume uma posição de relevância quando se trata do desempenho e eficiência de qualquer terminal.

Lembre-se que, neste trabalho, o objetivo é a minimização do número de *overstows* quando descarregados os contentores pelos portos de destino. Portanto, o *layout* do parque de contentores do porto da Figueira da Foz é determinado essencialmente nesse sentido, podendo no entanto apoiar-se noutros fatores.

As estratégias praticadas até à presente data pela operadora *Liscont* são descritas na Secção 4.2 e apresentadas na Figura 4.7.

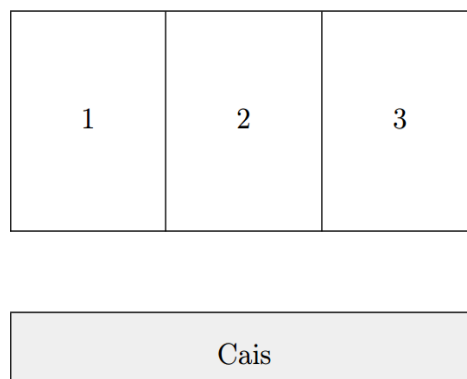


Figura 4.7: Representação da estratégia de arrumação de contentores no parque do terminal do porto da Figueira da Foz, praticada pela *Liscont*, onde na área 1 podem ser armazenados contentores com menos de 25 toneladas, na área 2 contentores entre 25 e 35 toneladas e finalmente na área 3 contentores com mais de 35 toneladas.

Porém, é possível alterar alguns aspetos das estratégias anteriormente citadas de forma a obter melhorias nos variados procedimentos inerentes à arrumação dos contentores no parque.

É de referir que o *layout* que se irá propor nunca foi colocado em prática no porto da Figueira da Foz, contudo este tem como base alguns estudos validados que são apresentados na Secção 3.2.

De forma a clarificar a proposta para o novo *layout* do parque, irá ser apresentada cada área em que este será dividido bem como a localização destas e a justificação para essas escolhas.

A logística do parque passará pela tipologia do contentor, pelo seu porto de destino e ainda pelo seu peso.

Inicialmente, o parque é dividido em duas áreas, uma área correspondente ao armazenamento de contentores de importação e outra referente aos contentores de exportação (Figura 4.8, (a)). Note-se que, por norma, os contentores de importação encontram-se vazios, como mencionado na Secção 4.2. Os contentores mistos são tratados da mesma forma que os de exportação, quanto ao seu armazenamento no parque.

Uma vez que, no terminal do porto em causa, não circulam contentores que transportem mercadorias perigosas ou que necessitem de refrigeração, não é necessário delimitar uma área somente para contentores com estas particularidades.

Esta primeira divisão é sugerida tendo em conta o estudo realizado por *Shen e Khoong*, em 1995. Lembre-se que estes autores abordaram o problema de armazenamento e movimentação de contentores vazios e concluíram que estes deviam ser armazenados em locais diferentes dos contentores com carga, visto que poderiam ser submetidos a operações extra. Para além disso, reforçando a ideia desta primeira divisão, salienta-se o facto de os contentores de importação poderem ser empilhados em alturas maiores do que os contentores de exportação. É também de referir que os contentores de importação podem apresentar uma data de saída do parque indefinida e assim sendo, com esta divisão, torna-se possível reduzir os movimentos de desperdício realizados pelos equipamentos, visto que, os contentores de exportação não prejudicam a movimentação dos contentores de importação e vice-versa.

Após, a divisão anterior, as áreas acima mencionadas são subdivididas em duas áreas cada (Figura 4.8, (b)). Quanto à área referente ao armazenamento de contentores de importação, é feita uma repartição consoante a capacidade destes, já que se tratam de contentores vazios, ou seja, a data de saída do parque pode ser desconhecida e os restantes parâmetros são irrelevantes para o transporte terrestre. Assim, formam-se duas novas áreas, uma referente aos contentores de 20' de comprimento e outra aos contentores de 40' de comprimento. Já a área que diz respeito aos contentores de exportação é repartida também em duas áreas, todavia tendo em conta o destino dos contentores. Isto é, passa a existir uma área em que só podem ser armazenados contentores com destino ao porto de Leixões e outra área para os contentores com destino ao porto de Casablanca.

É de salientar que a última estratégia mencionada e a que é apresentada de seguida têm em conta fatores importantes que estão severamente relacionados com o carregamento do navio, esclarecendo assim a conveniência das divisões realizadas no parque.

Por fim, é então necessário fazer considerações quanto ao peso dos contentores. Portanto, por último, a área onde são armazenados os contentores destinados ao porto de Leixões é subdividida em três, nomeadamente a área onde são colocados contentores com menos de 25 toneladas, outra onde apenas se posicionam contentores entre 25 e 35 toneladas e, por fim, a área onde são depositados contentores com mais de 35 toneladas. Esta subdivisão é praticada também na área para contentores com destino ao porto de Casablanca (Figura 4.8, (c)).

Note-se que esta última estratégia é a praticada pela operadora *Liscont* e foi mantida pois, já em 2000, *Kim et al.* afirmavam que os movimentos de desperdício, *overstows*, aconteciam em maior número, quando eram empilhados contentores de exportação mais leves sob contentores de exportação mais pesados, já que os primeiros contentores mencionados eram os últimos a serem carregados no navio.

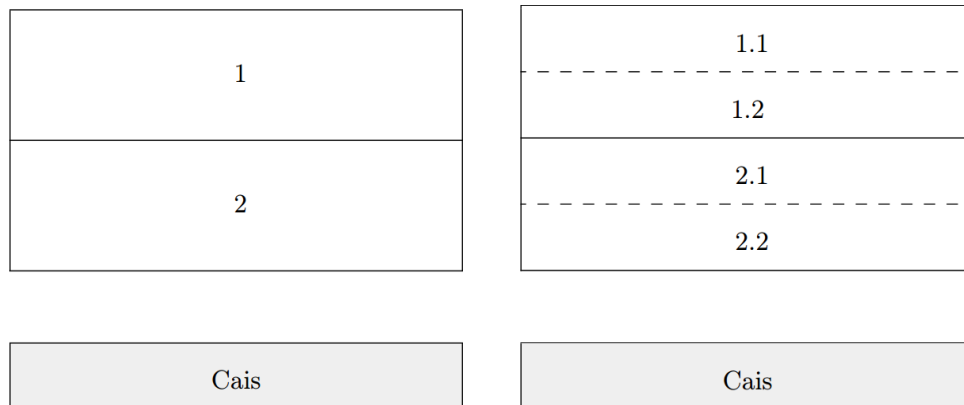
Assim, a junção de todas as estratégias anteriormente referidas torna mais fácil a

organização dos contentores para um posterior carregamento de forma a que a situação que gera *overstows* seja minimizada ao máximo. Relembre-se que antes de serem alocados no navio, os contentores são transportados temporariamente até uma área junto à zona onde o navio atraca. Ora, desta forma, a operação acima referida seria realizada rápida e eficientemente, visto que os contentores à priori seriam distribuídos por áreas de acordo com a sua tipologia bem como o seu destino e o seu peso.

É ainda necessário referir que neste novo *layout* existem igualmente corredores para que os equipamentos possam circular em segurança e movimentar os contentores do parque até ao navio ou do parque até aos camiões. Nas subfiguras da Figura 4.8 esses corredores são representados pelas linhas a preto que delimitam as diversas áreas.

De forma, a manter a segurança já assegurada na estratégia da operadora *Liscont* mantém-se o limite estabelecido para o empilhamento de contentores de exportação, isto é, podem ser empilhados até três contentores no máximo.

No que diz respeito à disposição das áreas acima descritas pelo parque, estas seriam dispostas paralelamente ao cais, como se pode observar na Figura 4.8.



(a) Divisão inicial do parque em duas áreas: área 1 e 2 que correspondem respetivamente às áreas de importação e exportação.

(b) Divisão da área 1 em duas áreas: área 1.1 e 1.2 que correspondem respetivamente às áreas de armazenamento de contentores de 20' e 40' de comprimento. E divisão da área 2 também em duas áreas: 2.1 e 2.2 que correspondem respetivamente às áreas de armazenamento de contentores com destino ao porto 1 e 2.

1.1		
1.2		
2.1A	2.1B	2.1C
2.2A	2.2B	2.2C

Cais
------

(c) Finalmente, divisão da área 2.1 em três áreas: 2.1A, 2.1B e 2.1C que correspondem respectivamente às áreas de armazenamento de contentores com peso inferior a 25 toneladas, entre 25 e 35 toneladas e superior a 35 toneladas. De igual forma é dividida a área 2.2.

Figura 4.8: Representação da proposta referente ao *layout* do parque de contentores do terminal do porto da Figueira da Foz.

Esta decisão tem como base a validação do trabalho realizado, em 2008, por *Kim et al.*. Os autores referidos chegaram à conclusão que os custos de viagem dos transportes e de deslocalização de alguns equipamentos era minimizado quando se observava uma disposição paralela das várias áreas do parque ao cais, considerando um parque com formato retangular. Desta forma, este estudo teve um peso considerável no planeamento do novo *layout* do parque de contentores pois, para além da minimização do número de *overstows*, pretendem-se também otimizar outros fatores, como por exemplo, o tempo e o custo referentes à movimentação dos equipamentos no terminal.

## Capítulo 5

# Resultados e Discussão

No presente capítulo, pretende-se usar o modelo matemático apresentado na Secção 4.3 para encontrar soluções admissíveis para o CSP usando as diferentes instâncias apresentadas nas Secções A.4, A.5 e A.6.

Para tal, é usado um computador pessoal com processador *Intel(R) Pentium(R) Dual CPU T2330 - 1.60 GHz* e com *2 GB* de memória (*RAM*).

Numa primeira fase, o *software* auxiliar é *Xpress Optimizer*, versão 28.01.04.

Posteriormente, recorre-se ao *SolverStudio*, versão 0.09.02, suplemento do *Excel*, versão 2010, para que seja dado a conhecer o contributo para a operadora *Liscont*.

### 5.1 Modelo de Programação Linear Para o CSP

Abaixo, nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, para cada uma das instâncias exibidas nas Secções A.4, A.5 e A.6 respetivamente, é apresentado o valor da função objetivo bem como o tempo computacional dispendido (expresso em segundos) para a obtenção do resultado, o número de variáveis e restrições e, ainda, o valor do GAP (expresso em percentagem).

Note-se que o termo GAP diz respeito à diferença relativa entre o valor da função objetivo encontrado e o melhor majorante, ou seja, o valor da função objetivo da solução ótima.

Instâncias	Valor da Função Obj.	Tempo Comp. (Seg.)	GAP (%)	N.º de Variáveis	N.º de Restrições
1	0	0.124	0	448	705
2	0	0.125	0	448	705
3	0	0.125	0	448	705
4	0	0.109	0	448	705
5	0	0.14	0	869	764
6	0	0.141	0	764	869

7	0	0.156	0	764	869
8	0	0.156	0	250	277
9	0	0.11	0	350	527
10	0	0.125	0	448	705
11	0	0.171	0	448	705
12	0	0.14	0	448	705
13	0	0.124	0	448	705
14	0	0.156	0	869	764
15	1	0.094	0	448	705
16	0	0.109	0	350	527
17	1	3.604	0	352	627
18	1	10.998	0	687	763

Tabela 5.1: Resultados obtidos para o CSP com 2 portos de destino, no *Xpress Optimizer*, usando a formulação mencionada na Secção 4.3.

Instâncias	Valor da Função Obj.	Tempo Comp. (Seg.)	GAP (%)	N.º de Variáveis	N.º de Restrições
1	0	0.312	0	1051	1719
2	0	0.296	0	1051	1749
3	0	0.483	0	1966	1768
4	0	0.312	0	1051	1749
5	0	0.327	0	1051	1719
6	0	0.312	0	1051	1719
7	0	0.406	0	1051	1749
8	0	0.655	0	1966	1776
9	0	0.484	0	1966	1768
10	0	0.312	0	1051	1719



11	0	0.359	0	1051	1749
12	0	0.514	0	1966	1768
13	0	0.312	0	1051	1749
14	0	0.39	0	1051	1719
15	1	0.406	0	994	1671
16	1	0.577	0	994	1634
17	1	0.718	0	994	1682
18	1	20.59	0	869	1383

Tabela 5.2: Resultados obtidos para o CSP com 5 portos de destino, no *Xpress Optimizer*, usando a formulação mencionada na Secção 4.3.

Instâncias	Valor da Função Obj.	Tempo Comp. (Seg.)	GAP (%)	N.º de Variáveis	N.º de Restrições
1	0	0.827	0	1961	3364
2	0	0.765	0	1981	3494
3	0	1.045	0	3801	3489
4	0	0.858	0	1961	3394
5	0	0.858	0	1972	3375
6	0	0.858	0	1978	3426
7	0	0.843	0	1961	3394
8	0	1.123	0	3801	3523
9	0	1.139	0	3801	3484
10	0	1.326	0	1961	3364
11	0	1.42	0	1981	3494
12	0	3.136	0	3801	3484
13	0	0.795	0	1961	3394
14	0	1.202	0	1978	3396

15	1	1.903	0	1907	3319
16	1	2.262	0	1904	3316
17	1	3.042	0	1904	3279
18	0	1322.03	0	1961	3357

Tabela 5.3: Resultados obtidos para o CSP com 10 portos de destino, no *Xpress Optimizer*, usando a formulação mencionada na Secção 4.3.

Primeiramente, é de notar que as soluções obtidas em todas as instâncias, para os três casos, são soluções ótimas, uma vez que o GAP é nulo (coluna quatro das Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3.)

Note-se que as soluções acima apresentadas são todas geradas em tempo útil. Os tempos computacionais obtidos são bastante reduzidos à exceção dos respeitantes às instâncias 18, que se verificam mais elevados (considerando-se ainda aceitáveis). De facto, verificasse que, para a instância 18 das Tabelas 5.1 e 5.2, o valor referente ao tempo computacional distancia-se de todos os outros. O mesmo acontece na Tabela 5.3 numa dimensão ainda maior. Tal acontece visto que para a instância 18, dos três casos, é encontrado um maior número de soluções do que para as restantes instâncias e, assim sendo, o *software* dispense de um tempo computacional mais elevado para analisar cada uma de forma a encontrar a solução que se aproxima ou mesmo que se iguala ao melhor majorante, isto é, do valor da solução ótima.

Para o caso com 2 e 10 portos, existem três situações em que ocorrem *overstows*, enquanto que para o caso com 5 portos existem quatro. As três situações referidas dizem respeito às instâncias 15, 17 e 18, para o caso com 2 portos, e 15, 16 e 17 para o caso com 10 portos. Já para o caso com 5 portos, as quatro situações mencionadas dizem respeito às instâncias 15, 16, 17 e 18.

Na Figura 5.1 é apresentado o comportamento do tempo computacional em função do número de portos, para as instâncias 1 a 17, dos três casos. Observa-se então que, em geral, existe um aumento do tempo computacional com o aumento do número de portos, como seria de esperar. Apenas na instância 17 não se verifica o comportamento referido, sendo de notar que, para o caso com 2 portos, o tempo computacional é um pouco mais elevado do que para os restantes dois casos. Esta situação ocorre pois para o caso com 2 portos, na referida instância, é considerado, no total, um maior número de contentores de 20' de comprimento do que para os casos com 5 e 10 portos.

São omitidas as instâncias 18, no gráfico da Figura 5.1, de forma a observar-se mais clara e precisamente o que acima foi dito, uma vez que os valores das segundas colunas das Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, para as ditas instâncias, são muito mais elevados quando comparados aos outros.

Nas Figuras 5.2 e 5.3 é apresentado o comportamento do número de variáveis e restrições, respetivamente, em função do número de portos. Observa-se nitidamente que há um aumento do número de variáveis e restrições com o aumento do número de portos, como é também de prever, explicando assim o comportamento do tempo computacional em função do número de portos.

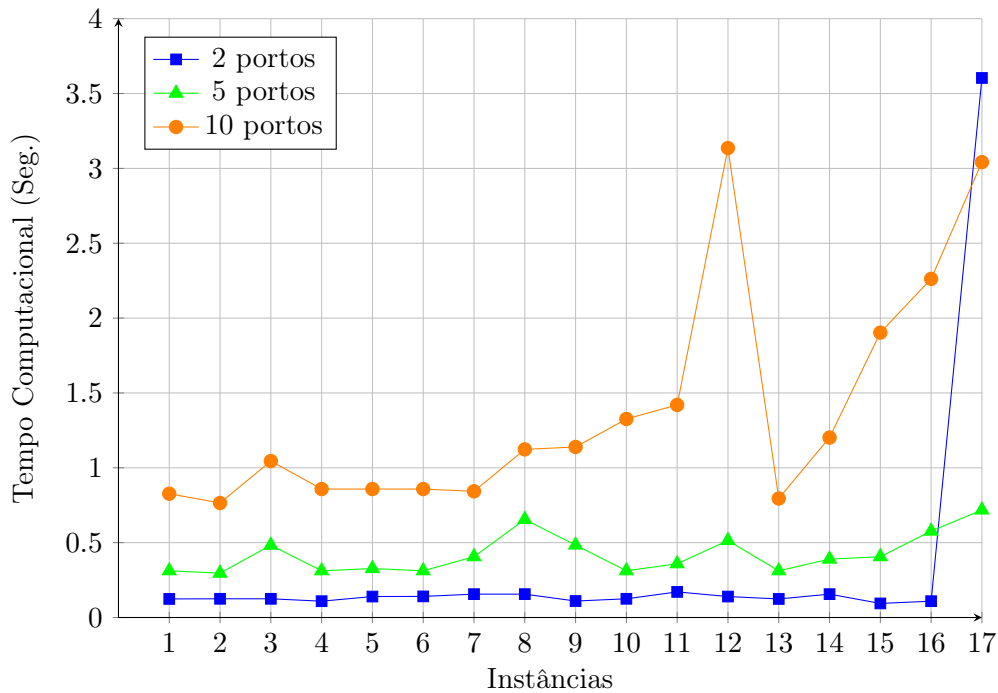


Figura 5.1: Comportamento do tempo computacional em função do número de portos de destino, usando os casos de estudo com 2, 5 e 10 portos.

Assim, as Figuras 5.1, 5.2 e 5.3, juntamente com as conclusões já mencionadas, demonstram a complexidade associada ao modelo matemático, que é apresentado na Secção 4.3.

É de frisar que, quando geradas as soluções no *Xpress Optimizer*, para além de se obter a informação presente nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, obtém-se ainda a disposição dos contentores pelas várias *slots* do navio. Daí, observa-se que não é realizado um empilhamento horizontal, o que significa que os contentores são alocados numa certa pilha até esta ficar completa e assim sucessivamente, verificando-se então um empilhamento vertical.

Lembre-se que dois contentores de 20' de comprimento juntos, formam um de 40' de comprimento, preenchendo uma *slot*. Uma vez que, nesta dissertação, não é atribuído um valor para o peso de cada contentor, assume-se que um contentor de 40' de comprimento pesa o dobro de um contentor de 20' de comprimento. Portanto assumindo o que anteriormente foi dito e tendo em conta que os contentores de exportação não vão vazios, não há algum problema em alocar dois contentores de 20' de comprimento sob um contentor de 40' de comprimento, não quebrando assim a regra nº1 imposta pela operadora *Liscont*. Note-se que, para todas as instâncias apresentadas nesta dissertação, se verifica a situação acima descrita.

Nas Figuras 5.4 e 5.5 são apresentadas as disposições dos contentores pelas várias *slots* do navio, obtidas quando geradas as soluções para duas instâncias em que são considerados 2 portos. Note-se que, nas figuras anteriormente mencionadas, cada retângulo representa uma *slot*. É ainda de frisar que os contentores com destino ao porto de Leixões, primeiro porto a ser visitado, estão representados a azul e os contentores com destino ao

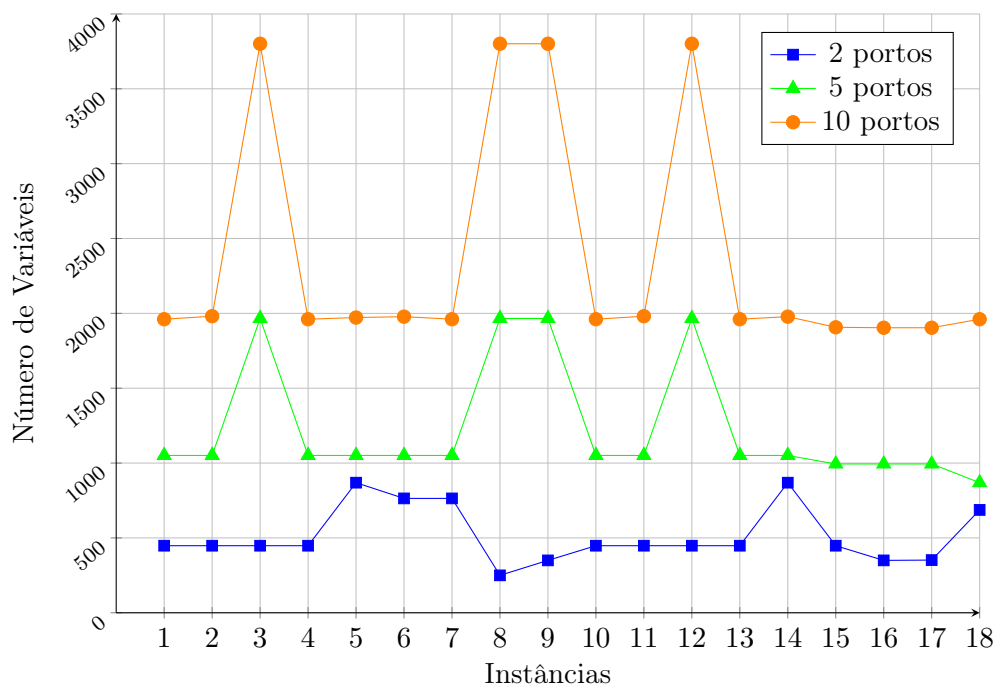


Figura 5.2: Comportamento do número de variáveis em função do número de portos de destino, usando os casos de estudo com 2, 5 e 10 portos.

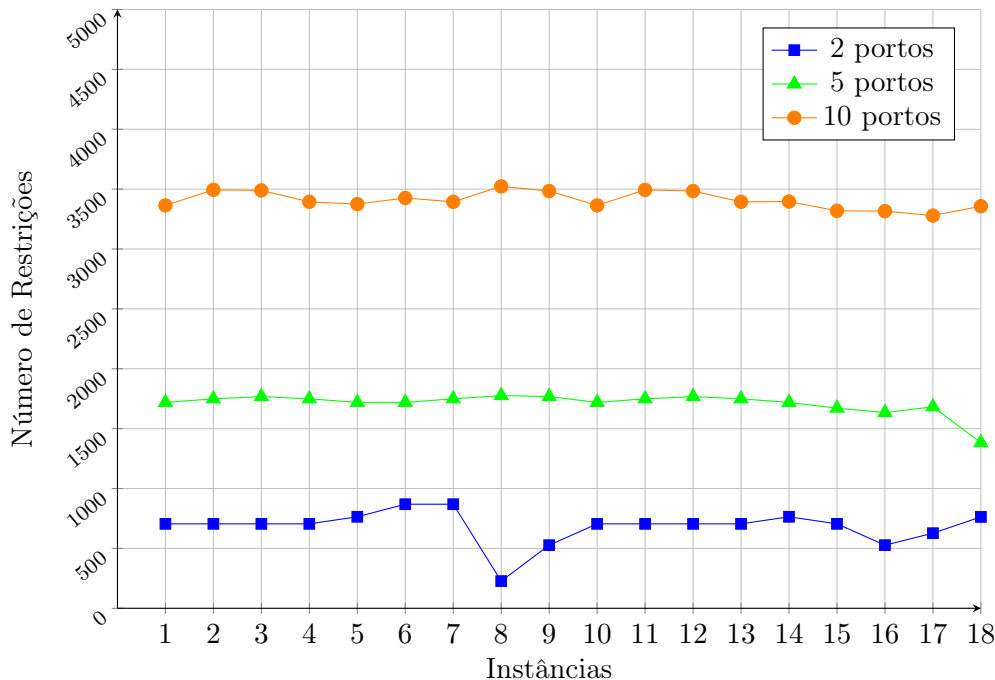
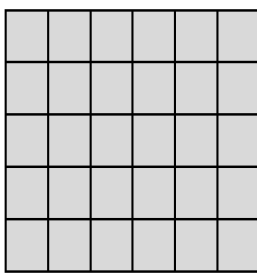


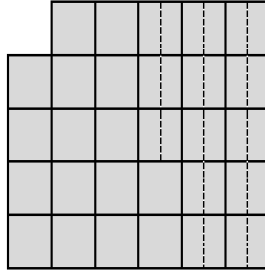
Figura 5.3: Comportamento do número de restrições em função do número de portos de destino, usando os casos de estudo com 2, 5 e 10 portos.

porto de Casablanca, último porto a ser visitado, estão representados a cinzento. Por fim, repare que certos retângulos são subdivididos por uma linha tracejada, isto significa que nas *slots* referentes a esses retângulos são alocados contentores de 20' de comprimento.

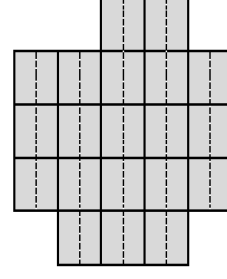
A Figura 5.4 retrata a solução gerada para a instância 14, em que não ocorrem *overtows*. É possível observar que nenhum contentor com destino ao primeiro porto, Leixões, é bloqueado por algum contentor com destino ao último porto, Casablanca.



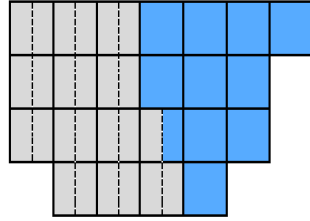
(a) Bay 1



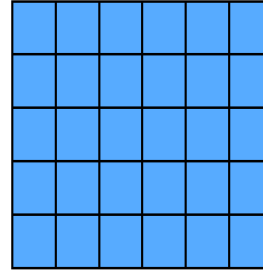
(b) Bay 2



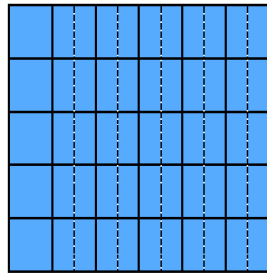
(c) Bay 3



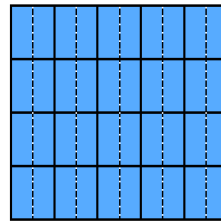
(d) Bay 4



(e) Bay 5



(f) Bay 6

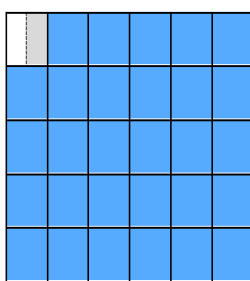


(g) Bay 7

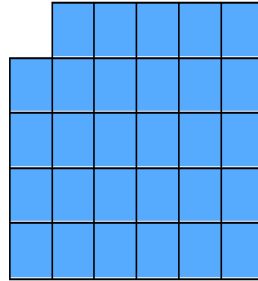
Figura 5.4: Representação da solução obtida para a instância 14, no *Xpress Optimizer*: vista frontal das *bays*.

Quanto à Figura 5.5, esta retrata a solução gerada para a instância 17, em que já ocorre um *overstow*. Observe-se que, na primeira *bay* representada, é alocado um dos três contentores de 20' de comprimento com destino ao porto de Casablanca no topo

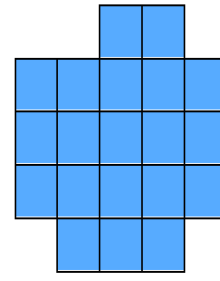
da primeira pilha, o que bloqueia o acesso aos contentores de 40' de comprimento com destino ao porto de Leixões alocados sob esse contentor nessa mesma pilha.



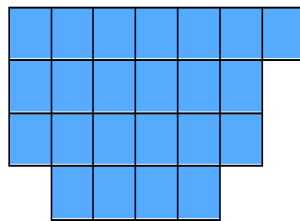
(a) Bay 1



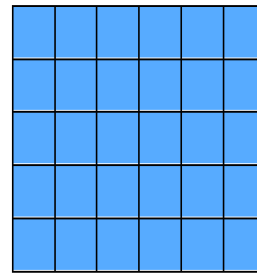
(b) Bay 2



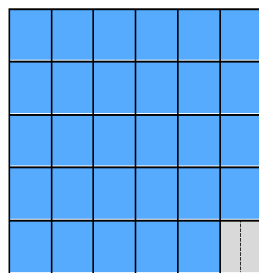
(c) Bay 3



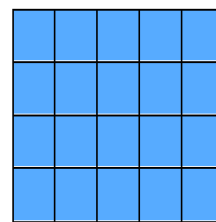
(d) Bay 4



(e) Bay 5



(f) Bay 6



(g) Bay 7

Figura 5.5: Representação da solução obtida para a instância 17, no *Xpress Optimizer*: vista frontal das *bays*.

## 5.2 Resolução do Modelo em SolverStudio

### 5.2.1 Excel e SolverStudio

O *Excel* é basicamente uma ferramenta universal e poderosa de elaboração de folhas de cálculo simples e sofisticadas, capazes de oferecer uma infinidade de recursos ao utilizador.

Já, o *SolverStudio* trata-se de um suplemento do *Excel* que permite ao utilizador criar e resolver modelos de otimização usando certas linguagens de modelação tais como Pulp, AMPL, CMPL, GMPL, GAMS, entre outras. Nesta dissertação, foi escolhida uma linguagem *open source*, GMPL.

Uma vez que, o *Excel* é, hoje em dia, uma ferramenta acessível, familiar e de fácil uso para qualquer pessoa, tornou-se então a opção ideal para criar um modelo como contributo à operadora *Liscont*.

Desta forma e uma vez que a operadora *Liscont* não possui ainda uma ferramenta deste tipo, torna-se possível melhorar a elaboração dos planos de estiva de forma eficiente.

### 5.2.2 Construção de Um Modelo no *SolverStudio*

Inicialmente, é necessário configurar os dados para um certo problema, isto é, identificar os conjuntos, parâmetros, constantes e variáveis que serão usados no modelo. Esses dados devem ser apresentados, da forma que o utilizador achar mais conveniente, numa folha de cálculo. É possível observar um exemplo na Figura 5.12.

Em seguida, os dados a serem tratados podem ser configurados utilizando o botão *Edit Data* do *SolverStudio* (exemplo exibido na Figura 5.10). Nesta etapa, é associada uma célula ou um conjunto de células a cada conjunto/parâmetro/constante/variável. Note-se que todos os dados descritos na folha de cálculo devem ser configurados usando o botão mencionado.

Mais pormenorizadamente, é aberta uma janela quando premido o botão *Edit data* e nessa mesma janela surgem quatro campos em branco, intitulados *Name*, *Cell Range* e *Index Ranges*. O campo *Name* diz respeito ao nome que o utilizador quer dar ao dado que está a tratar, podendo este ser um conjunto, um parâmetro, uma constante ou uma variável. No campo *Cell Range* é indicado qual ou quais as células, da folha de cálculo, em que esse dado é apresentado. E por fim, nos dois campos designados por *Index Ranges* o utilizador pode escolher os índices dos parâmetros ou das variáveis presentes no problema, escolhendo um conjunto de células, da folha de cálculo, que os caracterize. É de frisar que o *Excel* é uma ferramenta que apenas permite criar matrizes bidimensionais, daí apenas ser possível utilizar parâmetros ou variáveis com dois índices.

A qualquer momento, o utilizador pode acrescentar, alterar ou remover qualquer conjunto, parâmetro, constante ou variável, para tal basta utilizar novamente o botão *Edit Data*. Caso seja necessário remover um dado, o utilizador apenas necessita de procurá-lo na lista de dados exibida quando aberta a janela e carregar no botão *Delete Data Item*. Já no caso de querer alterar um dado, o procedimento é o mesmo, apenas tem que alterar o campo que pretende, referente a esse mesmo dado, e carregar no botão *Update Data Item*. Quanto ao procedimento necessário para acrescentar um dado, este é descrito no paragrafo anterior.

Usando o botão *Show Model* obtém-se o editor para construir o modelo para o problema e os menus a ele associados. Nesta etapa deve-se escolher uma linguagem de modelação entre todas as disponíveis, utilizando o botão *Language*. Na Figura 5.9, é possível observar, à direita, o painel referente ao primeiro botão referido neste parágrafo.

Após o desenvolvimento do modelo na linguagem escolhida, basta usar o botão *Solve Model* para o resolver e obter os resultados na folha de cálculo. É possível observar um exemplo na Figura 5.11. Para além disso, na janela *Model Output* é descrito o tempo e a memória computacional usados na resolução do problema, bem como outras informações

referentes à solução gerada (observar o canto inferior direito da figura acima mencionada).

### 5.2.3 Criação e Resolução do Modelo Para o CSP Descrito na Secção 4.3 no *SolverStudio*

Primeiramente, note-se que é usada a formulação matemática apresentada na Secção 4.3. De forma a obter resultados para o CSP, esta é reescrita na linguagem escolhida, GMPL. Porém, inicialmente é necessário manipular os parâmetros e as variáveis presentes no modelo referido uma vez que o *Excel* é um ambiente bidimensional.

O conjunto das filas e das pilhas referidos na Secção 4.3,  $C$  e  $S$  respetivamente, mantém-se. Já o conjunto dos portos e das *bays*,  $P$  e  $B$  respetivamente, é eliminado, sendo esta a principal diferença quando reescrito o modelo no *SolverStudio*. Ora, os parâmetros e as variáveis que possuem índices com referência ao conjunto dos portos e das *bays* são, então, substituídos por outros, ou seja, o que se representava em apenas uma restrição, passa a ser representado em vários grupos de restrições.

Assim, os parâmetros de entrada referentes à procura de cada porto de destino, passam a ser representados por (considerando o porto de Leixões e Casablanca o porto 1 e 2, respetivamente):

- $dt1$ , número de contentores de 20' de comprimento com destino ao porto 1,
- $dt2$ , número de contentores de 20' de comprimento com destino ao porto 2,
- $df1$ , número de contentores de 40' de comprimento com destino ao porto 1,
- $df2$ , número de contentores de 40' de comprimento com destino ao porto 2.

As variáveis  $t_{ibcs}$  e  $f_{ibcs}$ , apresentadas na Secção 4.3, são substituídas pelas seguintes respetivamente:  $t11_{c,s}, \dots, t17_{c,s}, t21_{c,s}, \dots, t27_{c,s}$  e  $f11_{c,s}, \dots, f17_{c,s}, f21_{c,s}, \dots, f27_{c,s}$ . Abaixo são apresentados os valores que estas variáveis podem tomar e os seus significados, no entanto isto é apenas realizado para algumas delas, visto que todas as outras seguem o mesmo raciocínio.

$$t27_{cs} = \begin{cases} 2 & , \text{ se à slot } (c, s) \text{ da bay 7 são alocados 2 contentores de 20' de comp.} \\ & \text{com destino ao porto 2.} \\ 1 & , \text{ se à slot } (c, s) \text{ da bay 7 é alocado 1 contentor de 20' de comp. com} \\ & \text{destino ao porto 2.} \\ 0 & , \text{ se à slot } (c, s) \text{ da bay 7 não é alocado nenhum contentor com destino} \\ & \text{ao porto 2.} \end{cases}$$

$$f27_{cs} = \begin{cases} 1 & , \text{ se à slot } (c, s) \text{ da bay 7 é alocado 1 contentor de 40' de comp. com} \\ & \text{destino ao porto 2.} \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases}$$



Quanto às variáveis  $Mpos_{bcs}$ , apresentadas na Secção 4.3, estas são substituídas por:  $Mpos1_{cs}, \dots, Mpos7_{cs}$ , onde

$$Mpos1_{cs} = \begin{cases} 1 & , \text{ se a slot } (c, s) \text{ da bay 1 não é uma slot do navio.} \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

e assim sucessivamente.

Por fim, as variáveis  $\theta_{bcs}$ , apresentadas na Secção 4.3, substituem-se pelas seguintes:  $\theta1_{cs}, \dots, \theta7_{cs}$ , tendo em conta que

$$\theta1_{cs} = \begin{cases} 1 & , \text{ se há } \textit{overstow} \text{ na slot } (c, s) \text{ da bay 1 do navio.} \\ 0 & , \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

e assim sucessivamente.

Desta forma, a função objetivo e as restrições do modelo apresentadas na Secção 4.3 têm que ser reformuladas, no entanto, as garantias e o sentido de cada umas delas são mantidos.

Tem-se então que a função objetivo (4.1) é substituída por:

$$\min \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} (\theta1_{cs} + \theta2_{cs} + \theta3_{cs} + \theta4_{cs} + \theta5_{cs} + \theta6_{cs} + \theta7_{cs}) \quad (5.1)$$

As restrições (4.2) passam a ser representadas pelas seguintes:

$$\sum_{c \in C} \sum_{s \in S} (t11_{cs} + t12_{cs} + t13_{cs} + t14_{cs} + t15_{cs} + t16_{cs} + t17_{cs}) = dt1 \quad (5.2)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{s \in S} (t21_{cs} + t22_{cs} + t23_{cs} + t24_{cs} + t25_{cs} + t26_{cs} + t27_{cs}) = dt2 \quad (5.3)$$

Enquanto que as restrições (4.3) são substituídas por:

$$\sum_{c \in C} \sum_{s \in S} (f11_{cs} + f12_{cs} + f13_{cs} + f14_{cs} + f15_{cs} + f16_{cs} + f17_{cs}) = df1 \quad (5.4)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{s \in S} (f21_{cs} + f22_{cs} + f23_{cs} + f24_{cs} + f25_{cs} + f26_{cs} + f27_{cs}) = df2 \quad (5.5)$$

Por sua vez, as restrições (4.4) são substituídas por:

$$t11_{cs} + 2Mpos1_{cs} \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.6)$$

$$t12_{cs} + 2Mpos2_{cs} \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.7)$$

$$t13_{cs} + 2Mpos3_{cs} \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.8)$$

$$t14_{cs} + 2Mpos4_{cs} \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.9)$$

$$t15_{cs} + 2Mpos5_{cs} \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.10)$$

$$t16_{cs} + 2Mpos6_{cs} \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.11)$$

$$t17_{cs} + 2Mpos7_{cs} \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.12)$$

$$t21_{cs} + 2Mpos1_{cs} \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.13)$$

$$t22_{cs} + 2Mpos2_{cs} \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.14)$$

$$t23_{cs} + 2Mpos3_{cs} \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.15)$$

$$t24_{cs} + 2Mpos4_{cs} \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.16)$$

$$t25_{cs} + 2Mpos5_{cs} \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.17)$$

$$t26_{cs} + 2Mpos6_{cs} \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.18)$$

$$t27_{cs} + 2Mpos7_{cs} \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.19)$$

E as restrições (4.5) são então representadas pelas seguintes:

$$f11_{cs} + Mpos1_{cs} \leq 1, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.20)$$

$$f12_{cs} + Mpos2_{cs} \leq 1, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.21)$$

$$f13_{cs} + Mpos3_{cs} \leq 1, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.22)$$

$$f14_{cs} + Mpos4_{cs} \leq 1, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.23)$$

$$f15_{cs} + Mpos5_{cs} \leq 1, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.24)$$

$$f16_{cs} + Mpos6_{cs} \leq 1, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.25)$$

$$f17_{cs} + Mpos7_{cs} \leq 1, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.26)$$

$$f21_{cs} + Mpos1_{cs} \leq 1, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.27)$$

$$f22_{cs} + Mpos2_{cs} \leq 1, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.28)$$

$$f23_{cs} + Mpos3_{cs} \leq 1, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.29)$$

$$f24_{cs} + Mpos4_{cs} \leq 1, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.30)$$

$$f25_{cs} + Mpos5_{cs} \leq 1, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.31)$$

$$f26_{cs} + Mpos6_{cs} \leq 1, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.32)$$

$$f27_{cs} + Mpos7_{cs} \leq 1, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.33)$$

As seguintes restrições vêm substituir as restrições (4.6):

$$t11_{cs} + t21_{cs} + 2(f11_{cs} + f21_{cs}) \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.34)$$

$$t12_{cs} + t22_{cs} + 2(f12_{cs} + f22_{cs}) \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.35)$$

$$t13_{cs} + t23_{cs} + 2(f13_{cs} + f23_{cs}) \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.36)$$

$$t14_{cs} + t24_{cs} + 2(f14_{cs} + f24_{cs}) \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.37)$$

$$t15_{cs} + t25_{cs} + 2(f15_{cs} + f25_{cs}) \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.38)$$

$$t16_{cs} + t26_{cs} + 2(f16_{cs} + f26_{cs}) \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.39)$$

$$t17_{cs} + t27_{cs} + 2(f17_{cs} + f27_{cs}) \leq 2, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.40)$$

Quanto às restrições (4.7), estas são substituídas por:

$$2f_{21_{cs}} + t_{21_{cs}} + 2f_{11_{ca}} + t_{11_{ca}} \leq 2(1 + \theta_{1_{cs}}), \quad \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \quad (5.41)$$

$$2f_{22_{cs}} + t_{22_{cs}} + 2f_{12_{ca}} + t_{12_{ca}} \leq 2(1 + \theta_{2_{cs}}), \quad \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \quad (5.42)$$

$$2f_{23_{cs}} + t_{23_{cs}} + 2f_{13_{ca}} + t_{13_{ca}} \leq 2(1 + \theta_{3_{cs}}), \quad \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \quad (5.43)$$

$$2f_{24_{cs}} + t_{24_{cs}} + 2f_{14_{ca}} + t_{14_{ca}} \leq 2(1 + \theta_{4_{cs}}), \quad \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \quad (5.44)$$

$$2f_{25_{cs}} + t_{25_{cs}} + 2f_{15_{ca}} + t_{15_{ca}} \leq 2(1 + \theta_{5_{cs}}), \quad \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \quad (5.45)$$

$$2f_{26_{cs}} + t_{26_{cs}} + 2f_{16_{ca}} + t_{16_{ca}} \leq 2(1 + \theta_{6_{cs}}), \quad \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \quad (5.46)$$

$$2f_{27_{cs}} + t_{27_{cs}} + 2f_{17_{ca}} + t_{17_{ca}} \leq 2(1 + \theta_{7_{cs}}), \quad \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \quad (5.47)$$

Já as restrições (4.8) são substituídas pelas seguintes:

$$\begin{aligned} t_{11_{cs}} + t_{21_{cs}} + 2(f_{11_{cs}} + f_{21_{cs}}) + 2Mpos1_{cs} \\ \leq t_{11_{ca}} + t_{21_{ca}} + 2(f_{11_{ca}} + f_{21_{ca}}) + 2Mpos1_{ca}, \\ \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \end{aligned} \quad (5.48)$$

$$\begin{aligned} t_{12_{cs}} + t_{22_{cs}} + 2(f_{12_{cs}} + f_{22_{cs}}) + 2Mpos2_{cs} \\ \leq t_{12_{ca}} + t_{22_{ca}} + 2(f_{12_{ca}} + f_{22_{ca}}) + 2Mpos2_{ca}, \\ \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \end{aligned} \quad (5.49)$$

$$\begin{aligned} t_{13_{cs}} + t_{23_{cs}} + 2(f_{13_{cs}} + f_{23_{cs}}) + 2Mpos3_{cs} \\ \leq t_{13_{ca}} + t_{23_{ca}} + 2(f_{13_{ca}} + f_{23_{ca}}) + 2Mpos3_{ca}, \\ \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \end{aligned} \quad (5.50)$$

$$\begin{aligned} t_{14_{cs}} + t_{24_{cs}} + 2(f_{14_{cs}} + f_{24_{cs}}) + 2Mpos4_{cs} \\ \leq t_{14_{ca}} + t_{24_{ca}} + 2(f_{14_{ca}} + f_{24_{ca}}) + 2Mpos4_{ca}, \\ \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \end{aligned} \quad (5.51)$$

$$\begin{aligned} t_{15_{cs}} + t_{25_{cs}} + 2(f_{15_{cs}} + f_{25_{cs}}) + 2Mpos5_{cs} \\ \leq t_{15_{ca}} + t_{25_{ca}} + 2(f_{15_{ca}} + f_{25_{ca}}) + 2Mpos5_{ca}, \\ \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \end{aligned} \quad (5.52)$$

$$\begin{aligned} t_{16_{cs}} + t_{26_{cs}} + 2(f_{16_{cs}} + f_{26_{cs}}) + 2Mpos6_{cs} \\ \leq t_{16_{ca}} + t_{26_{ca}} + 2(f_{16_{ca}} + f_{26_{ca}}) + 2Mpos6_{ca}, \\ \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \end{aligned} \quad (5.53)$$

$$\begin{aligned} t_{17_{cs}} + t_{27_{cs}} + 2(f_{17_{cs}} + f_{27_{cs}}) + 2Mpos7_{cs} \\ \leq t_{17_{ca}} + t_{27_{ca}} + 2(f_{17_{ca}} + f_{27_{ca}}) + 2Mpos7_{ca}, \\ \forall c \in C, \forall s, a < s \in S \end{aligned} \quad (5.54)$$

Por fim, são apresentadas as novas restrições referentes ao domínio das variáveis de decisão. Então, tem-se que as restrições (4.9) são substituídas por:

$$\theta_{1_{cs}}, \dots, \theta_{7_{cs}} \in \{0, 1\}, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.55)$$

Enquanto que as restrições (4.10) são substituídas pelas seguintes:

$$t_{12_{cs}}, \dots, t_{17_{cs}}, t_{21_{cs}}, \dots, t_{27_{cs}} \in \{0, 1, 2\}, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.56)$$

Já as restrições (4.11) são substituídas por:

$$f12_{cs}, \dots, f17_{cs}, f21_{cs}, \dots, f27_{cs} \in \{0, 1\}, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.57)$$

E finalmente as restrições (4.12) são substituídas por:

$$Mpos1_{cs}, \dots, Mpos7_{cs} \in \{0, 1\}, \quad \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5.58)$$

Na folha de cálculo do ficheiro desenvolvido para a empresa existem três áreas, intituladas parâmetros, variáveis e solução.

Na área referente aos parâmetros são apresentadas três subáreas. As duas primeiras subáreas são representadas por duas tabelas e, nas células a verde associadas ao *input* do modelo, é possível alterar os parâmetros de entrada, ou seja, o número de filas e pilhas (Células C4:C5) e, ainda, o número de contentores de 20' e 40' de comprimento associados ao pedido de cada porto de destino (Células D10:E11). Na Figura 5.9 é possível observar a escolha dos parâmetros de entrada para uma certa instância. Na primeira tabela é ainda apresentado o número de *bays*, no entanto, este não pode ser alterado devido à forma como foram criados os parâmetros e as variáveis, daí a célula apresentar-se a verde, porém riscada (Célula C3).

A restante subárea diz respeito à matriz de posições e portanto existem sete tabelas e cada uma delas é referente a uma *bay* (Células H3:BJ11). Tendo em conta que as *bays* não são regulares, nem todas as tabelas são iguais. Como referido anteriormente, sempre que uma *slot* faz parte do navio, nessa posição é colocado um 0 mas, caso contrário, é colocado um 1. É ainda possível verificar que as células a cinzento dizem respeito às *slots* onde não é possível alocar contentores. Desta forma, é então representada a estrutura de cada *bay* do navio referida na Secção 4.3.1.

Na área respeitante à solução, *output* do modelo, é apenas apresentado, numa célula a vermelho, o número de *overstows* (Célula C17). Observe a Figura 5.11 onde é apresentada a solução para uma determinada instância.

Finalmente, a área alusiva às variáveis é subdividida em cinco subáreas e em cada uma delas existem sete tabelas associadas às sete *bays* do navio (Figura 5.12). As subáreas dizem respeito à ocorrência de *overstows*, à alocação de contentores de 20' de comprimento com destino ao porto 1, à alocação de contentores de 20' de comprimento com destino ao porto 2, à alocação de contentores de 40' de comprimento com destino ao porto 1 e, por fim, à alocação de contentores de 40' de comprimento com destino ao porto 2 (Células H16:BJ72). Em todas estas tabelas, as células são preenchidas, quando gerada a solução para uma instância, com zeros e uns, à exceção das tabelas associadas aos contentores de 20' de comprimento, estas podem conter zeros, uns ou dois. O significado dos valores que cada variável pode tomar é apresentado acima.

São usadas as instâncias apresentadas na Secção A.4 para testar o modelo desenvolvido com o auxílio do *SolverStudio*.

Na Tabela 5.4, é dado a conhecer o valor da função objetivo para cada instância, assim como o tempo computacional usado (expresso em segundos) e ainda o valor do GAP (expresso em percentagem).

Instâncias	Valor da Função	Tempo	GAP (%)
	Objetivo	Comp. (Seg.)	
1	0	0.2	0
2	0	0.2	0
3	0	0.2	0
4	0	0.3	0
5	0	0.9	0
6	0	0.7	0
7	0	1.1	0
8	0	0.2	0
9	0	0.3	0
10	0	0.2	0
11	0	0.2	0
12	0	0.2	0
13	0	0.2	0
14	0	0.2	0
15	1	0.2	0
16	0	0.2	0
17	1	6.7	0
18	1	538.0	0

Tabela 5.4: Resultados obtidos para o CSP, no *Excel* com o auxílio do *SolverStudio*, usando a formulação mencionada na Secção 4.3.

Observe-se a última coluna da Tabela 5.4. Em todas as instâncias, o GAP é nulo, logo todas as soluções obtidas são ótimas, o que se verifica também quando geradas as soluções no *Xpress Optimizer*.

Tal como é observado na Secção 5.1, as soluções acima apresentadas são todas geradas em tempo útil. Os tempos computacionais obtidos são bastante reduzidos à exceção dos respeitantes às instâncias 17 e 18, que se verificam mais elevados (porém ainda

aceitáveis), sendo este facto muito mais notório na instância 18. A esta situação é aplicada a justificação dada na secção anterior, visto que quando geradas as soluções com o *Xpress Optimizer* o mesmo se verifica e dado que o modelo testado nos dois *softwares* é o mesmo e as instâncias que o validam também.

É de frisar que os tempos computacionais obtidos quando geradas as soluções no *Xpress Optimizer* são mais reduzidos do que quando geradas as soluções no *SolverStudio* (Figura 5.6). De facto, esta conclusão já seria de se esperar, uma vez que o *SolverStudio* é um ambiente mais básico do que o *Xpress Optimizer*.

São omitidas as instâncias 17 e 18, no gráfico da Figura 5.6, de forma a observar-se mais clara e precisamente o que acima foi dito, uma vez que os valores da segunda coluna da Tabela 5.4, para as instâncias mencionadas, são muito mais elevados do que os outros.

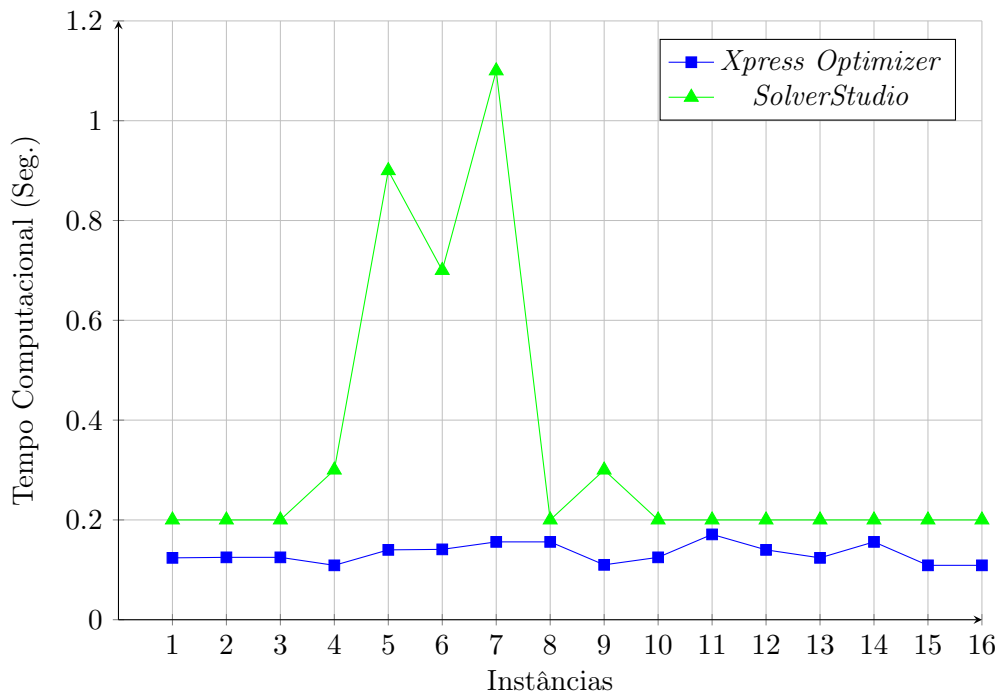


Figura 5.6: Comportamento do tempo computacional obtido na geração das soluções no *Xpress Optimizer* e no *SolverStudio*.

Existem apenas três situações em que ocorrem *overstows*, tal como acontece quando geradas as soluções no *Xpress Optimizer*, o que teria obrigatoriamente que acontecer, visto o modelo matemático e as instâncias de teste serem as mesmas quando usados os dois *softwares*, como já mencionado anteriormente.

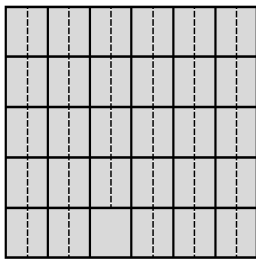
As situações acima referidas dizem respeito às instâncias 15, 17 e 18. Repare que na Tabela 5.1 as instâncias em que ocorrem *overstows* são precisamente as mesmas.

Uma vez que no ficheiro desenvolvido em *Excel* é possível verificar quais as *slots* em que são alocados os vários tipos de contentores, então são apresentadas, nas Figuras 5.7 e 5.8, as disposições dos contentores pelas várias *bays* do navio, para as mesmas duas instâncias escolhidas na Secção 5.1.

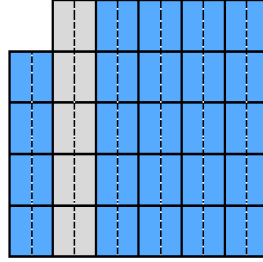
Recorde-se que os contentores com destino ao porto de Leixões estão representados a

azul enquanto que os contentores com destino ao porto de Casablanca estão representados a cinzento, tal como acontece na secção anterior. Para além disso, lembre-se que os retângulos que são subdivididos por uma linha tracejada representam os contentores de 20' de comprimento que são alocados na *slot* que esse mesmo retângulo representa.

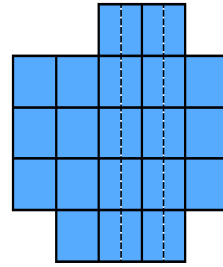
Note-se que na Figura 5.7 é apresentada a solução gerada para a instância 14, em que não ocorrem *overstows*. Tal como referido na Secção 5.1, nesta instância, nenhum contentor com destino ao porto de Casablanca bloqueia algum contentor com destino ao porto de Leixões, primeiro porto a ser visitado.



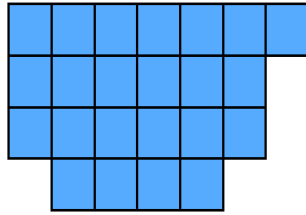
(a) Bay 1



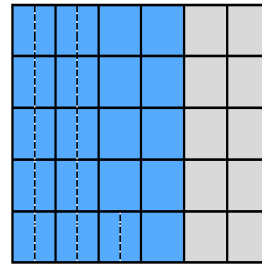
(b) Bay 2



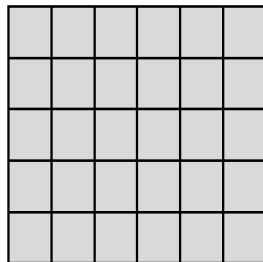
(c) Bay 3



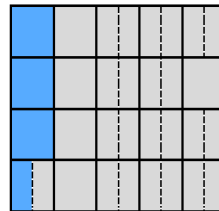
(d) Bay 4



(e) Bay 5



(f) Bay 6

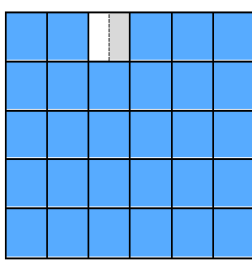


(g) Bay 7

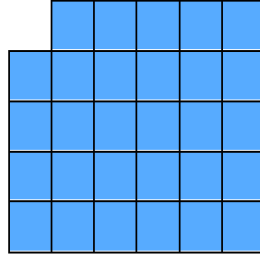
Figura 5.7: Representação da solução obtida para a instância 14, no *SolverStudio*: vista frontal das *bays*.

Já a Figura 5.8 retrata a solução gerada para a instância 17, em que ocorre um

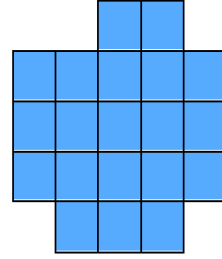
*overflow*. De facto, verificando a terceira pilha da primeira *bay* observa-se que é alocado um contentor de 20' de comprimento com destino ao porto de Casablanca, último porto a ser visitado, no topo da pilha, o que não permite o acesso aos restantes contentores que têm como destino o porto de Leixões.



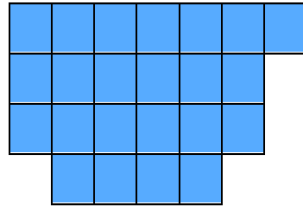
(a) Bay 1



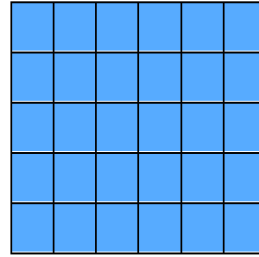
(b) Bay 2



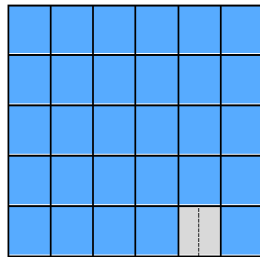
(c) Bay 3



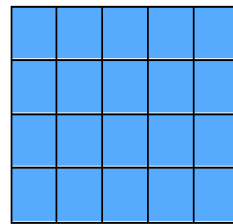
(d) Bay 4



(e) Bay 5



(f) Bay 6



(g) Bay 7

Figura 5.8: Representação da solução obtida para a instância 17, no *SolverStudio*: vista frontal das *bays*.

Apesar de apenas serem representadas duas situações, sabe-se que, para todas as instâncias em que se consideram 2 portos, as disposições dos contentores obtidas quando geradas as soluções no *SolverStudio* são diferentes das obtidas quando geradas as soluções no *Xpress Optimizer*. De facto, observando as Figuras 5.4 e 5.5 da Secção anterior e as Figuras 5.7 e 5.8 verifica-se que a disposição dos contentores nas diversas *slots* não é



igual.

Assim, verifica-se que existe um conjunto de soluções ótimas para as 18 instâncias apresentadas na Secção A.4, ou seja, é possível dispor os contentores associados a uma instância de variadas maneiras, obtendo sempre o mesmo valor para a função objetivo, neste caso, o mesmo número de *overstows*.

Por fim, é possível afirmar que o ficheiro desenvolvido como contributo à empresa é fiável e pode, então, ser uma ferramenta útil para a operadora *Liscont*.

### 5.2.4 Snapshots do ficheiro desenvolvido em Excel

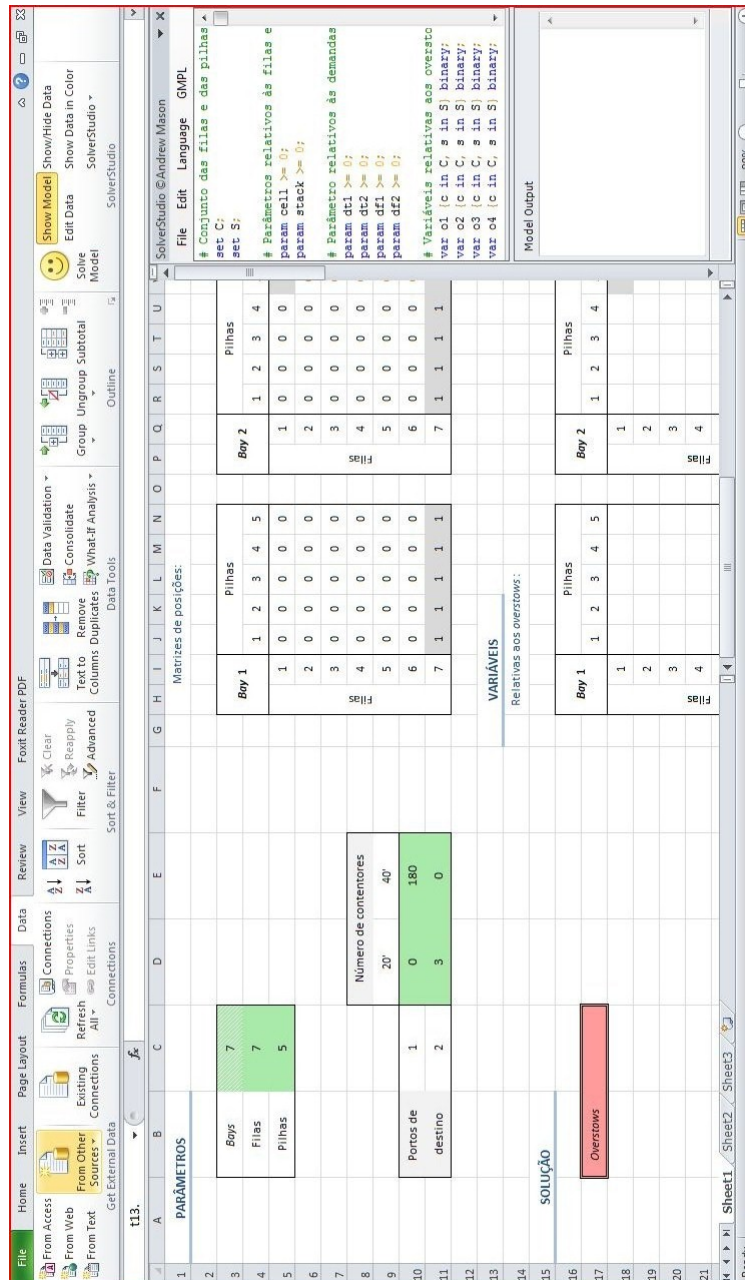


Figura 5.9: Snapshot do ficheiro desenvolvido em Excel como contributo para a empresa: escolha dos valores para os parâmetros de entrada para a instância 17 da Secção A.4.

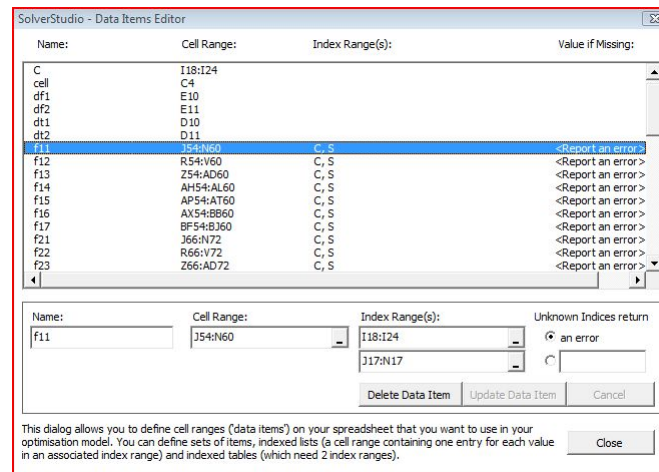


Figura 5.10: *Snapshot* do ficheiro desenvolvido em *Excel* como contributo para a empresa: configuração dos dados usando o botão *Edit Data* do *SolverStudio*.

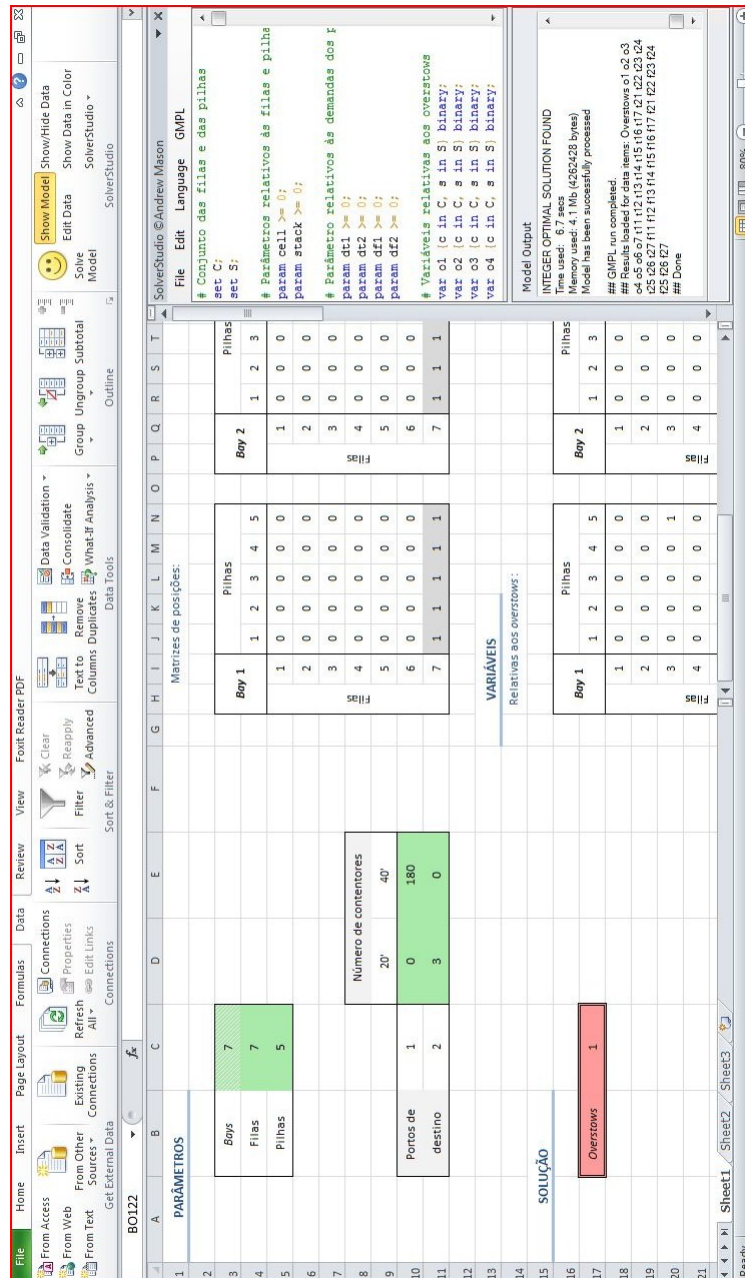


Figura 5.11: *Snapshot* do ficheiro desenvolvido em *Excel* como contributo para a empresa: apresentação do número de *overstows* na solução gerada para a instância 17 da Secção A.4.

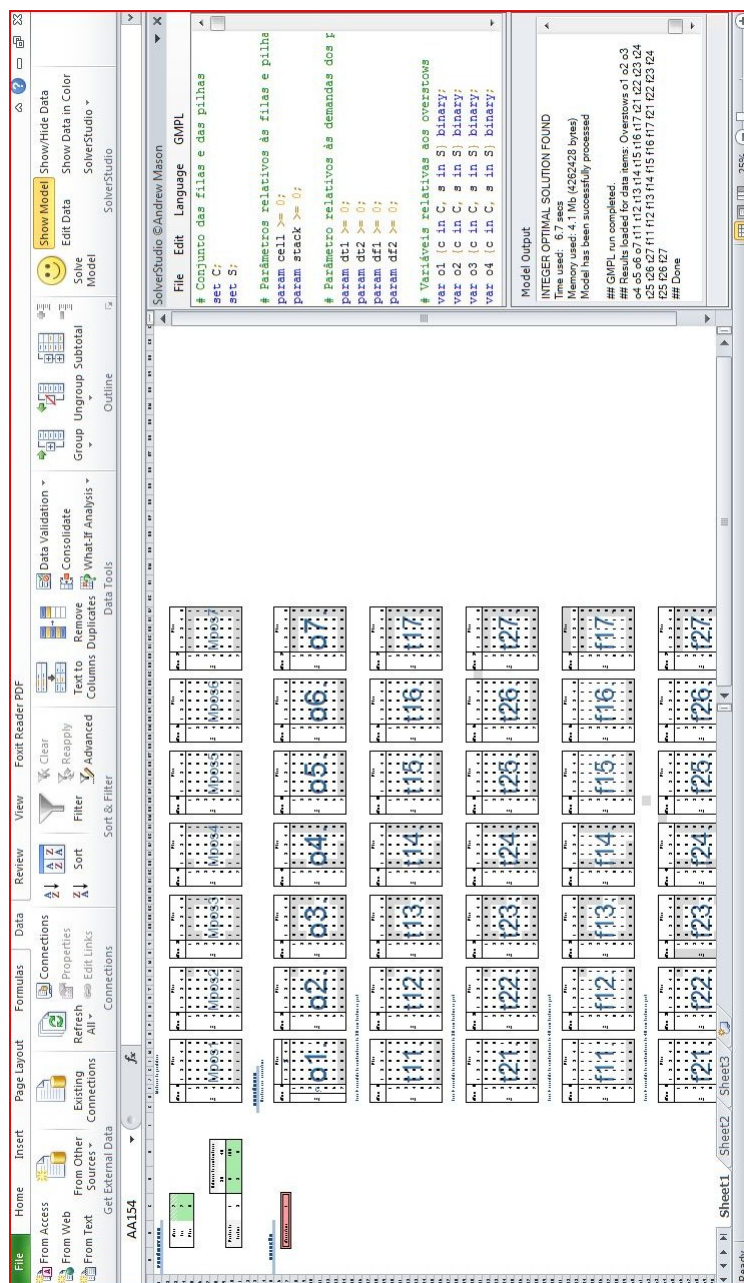


Figura 5.12: *Snapshot* do ficheiro desenvolvido em *Excel* como contributo para a empresa: visão geral do ficheiro quando gerada a solução para a instância 17 da Secção A.4.



## Capítulo 6

# Conclusões e Trabalho Futuro

Esta dissertação tem o intuito de estudar o problema de alocação de contentores num navio, CSP, de forma a minimizar o número total de *overstows*. Com este problema surge a necessidade de estudar o *layout* de parques de contentores, visto que este fator está severamente ligado ao número de *overstows* que possam surgir aquando da descarga dos contentores nos portos de destino. O porto escolhido para participar neste estudo é o porto da Figueira da Foz, sendo que as operações relacionadas com a movimentação de contentores estão a cargo da operadora *Liscont*.

São então descritas todas as características do problema presente no referido porto e é apresentado um modelo matemático para este em programação linear, que é validado por várias instâncias criadas aleatoriamente e testadas, numa primeira etapa, no *software Xpress Optimizer*.

Quando realizada uma análise de sensibilidade, verifica-se que com o aumento do número de portos de destino, o número de variáveis e restrições aumenta, e por consequência verifica-se também um aumento do tempo computacional, o que demonstra a complexidade associada ao modelo matemático em causa.

Numa segunda etapa, o modelo matemático acima mencionado é testado no *SolverStudio*, suplemento do *Excel*, e validado por um grupo das instâncias anteriormente referidas. É então criado um ficheiro em *Excel* que se traduz numa ferramenta útil e acessível à operadora *Liscont*.

Note-se que os tempos computacionais obtidos quando geradas as soluções no *Xpress Optimizer* são inferiores aos obtidos quando geradas as soluções no *SolverStudio*, devido a este ser um ambiente mais básico. Observa-se ainda que, nos dois *softwares*, o número de instâncias em que ocorrem *overstows* é igual.

Verifica-se, através da diferença observada nas disposições dos contentores pelas várias *slots* do navio quando geradas as soluções nos dois *softwares*, que existe não uma mas um conjunto de soluções ótimas para as instâncias em causa.

Tendo em conta o principal objetivo desta dissertação e, também, alguns aspetos validados em trabalhos de maior relevância parece haver oportunidade para melhorar o *layout* do parque de contentores no porto da Figueira da Foz.

A estratégia praticada pela operadora *Liscont* no parque de contentores passa, apenas, pela divisão dos contentores segundo o seu peso. Quanto à disposição das áreas do parque, esta é feita perpendicularmente ao cais. Assim, de forma a obter melhorias nos variados procedimentos inerentes à arrumação dos contentores no parque, as estratégias sugeridas focam-se na tipologia do contentor, no seu porto de destino e no seu peso. Para além

disso, é proposta a disposição paralela, em relação ao cais, das novas áreas do parque.

A proposta para o *layout* do parque de contentores, permite então que a alocação temporária dos contentores numa zona junto ao cais e o posterior carregamento destes no navio se torne uma tarefa rápida e eficiente, uma vez que os contentores estão já separados por categorias. No entanto, é de frisar que esta proposta não foi colocada em prática, sendo que seria necessário testar as estratégias propostas num contexto real para poder confirmar as suas vantagens.

Seria de interesse futuro o estudo da aplicação do modelo matemático apresentado nesta dissertação colocando a hipótese da afluência da movimentação de contentores no porto em estudo aumentar significativamente, dado que se tem vindo a verificar um elevado crescimento do transporte marítimo contentorizado e podendo esta hipótese ser uma futura realidade.

O modelo proposto pode perfeitamente ser melhorado e testado no que diz respeito à eficiência e à robustez, caracterizando novas instâncias onde certos parâmetros do problema variem, como por exemplo, o número de navios.

Outro aspecto que se poderia, também, ter em conta seria a inclusão de prazos de entrega da mercadoria, sendo possível avaliar o comportamento do modelo quando verificados prazos homogêneos ou heterogêneos, isto é, respetivamente prazos iguais ou diferentes para os vários portos de destino.

Assim, seria possível estudar com mais detalhe a complexidade do problema e apresentar resultados mais consistentes no que diz respeito ao estudo do tempo computacional em função do número de navios bem como dos prazos de entrega da mercadoria.

E ainda, para completar o modelo e exibir os resultados de forma clara e prática tendo em conta a estrutura física do navio, seria de interesse adicionar restrições que forçassem a alocação de contentores de 20' e 40' de comprimento nas *bays* ímpares e pares respectivamente, como referido na Secção 2.2.1 e como apresentado na Figura A.1.

Desta forma, poder-se-iam, também, apresentar novas redefinições de *layout* do parque, visto a arrumação dos contentores ser provavelmente a tarefa com mais influência sobre o rendimento e eficiência de qualquer terminal.



# Referências

- [1] ABC-Containers [Acedido em 2015], ‘CSC Plating’, <http://www.abcccontainers.com.au/shipping-containers/2x10ft-container-set>.
- [2] Ambrosino, D. and Sciomachen, A. [1998], ‘A constraint satisfaction approach for master bay plans’, *Maritime Engineering and Ports* **36**.
- [3] Ambrosino, D., Sciomachen, A., Anghionolfi, D. and Paolucci, M. [2009], ‘A new three-step for the master bay plan problem’, *Maritime Economics and Logistics* **11**, 98–120.
- [4] Ambrosino, D., Sciomachen, A., Anghionolfi, D. and Paolucci, M. [2010], ‘An experimental comparsion of different heuristics for the master bay plan problem’, *Experimental Algorithms* pp. 314–325.
- [5] Ambrosino, D., Sciomachen, A. and Tanfani, E. [2004a], ‘Stowing a containership: the master bay plan problem’, *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **38**, 81–99.
- [6] Ambrosino, D., Sciomachen, A. and Tanfani, E. [2004b], ‘Stowing a containership: the master bay plan problem’, *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **28**, 81–99.
- [7] Ambrosino, D., Sciomachen, A. and Tanfani, E. [2006], ‘A decomposition heuristics for the container ship stowage problem’, *Journal of Heuristics* **12**, 211–233.
- [8] Avriel, M. and Penn, M. [1993], ‘Exact and approximate solutions of the container ship stowage problem’, *Industrial Engineering* **25**, 271–274.
- [9] Avriel, M., Penn, M. and Shpirer, N. [2000], ‘Container ship stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs’, *Discrete Applied Mathematics* **103**, 271–279.
- [10] Avriel, M., Penn, M., Shpirer, N. and Witteboon, S. [1998], ‘Stowage planning for container ships to reduce the number of shifts’, *Operational Research Society* **76**, 55–71.
- [11] Botter, R. C. and Brinati, M. A. [1992], ‘Stowage container planning: a model for getting an optimal solution’, *Computer Applications in the Automation of Shipyard Operation and Ship Design* **VII**.
- [12] Cherques, S. [1999], *Dicionário do Mar*, Editora Globo.

- [13] Chou, M. C. and Ding, D. [2009], ‘Stowage planning for container ships to achieve operations efficiency’, *European Journal of Operational Research* .
- [14] Delgado, A., Jensen, R., Janstrup, K., Rose, T. and Andersen, K. [2012], ‘A constraint programming model for fast optimal stowage of container vessel bays’, *European Journal of Operational Research* **220**, 251–261.
- [15] Dubrovsky, O., Levitin, G. and Penn, M. [2002], ‘A genetic algorithm with a compact solution encoding for the container ship stowage problem’, *Journal of Heuristics* **8**, 585–599.
- [16] Eyres, D. [1998], *Ship construction*, Butterworth Heinemann.
- [17] Giemsch, P. [2004], ‘Stowage planning and pile problems’.
- [18] Gummus, M., Kaminsky, P., Tiemroth, E. and Ayik, M. [2008], ‘A multi-stage decomposition heuristic for the container stowage problem’, *Desautels Faculty of Management* .
- [19] Hapag-Lloyd [Acedido em 2015], ‘Container Specification’, [https://www.hapag-lloyd.com/en/products\\_and\\_services/product\\_brochures.html](https://www.hapag-lloyd.com/en/products_and_services/product_brochures.html).
- [20] Ibrahimi, M., Castilho, B. and Dangazo, C. [1993], ‘Storage space vs handling work in container terminals’, *Transportation Research Part B: Methodological* **27**, 13–32.
- [21] Imai, A., Sasaki, K., Nishimura, E. and Papadimitriou, S. [2006], ‘Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks’, *European Journal of Operational Research* **171**, 373–389.
- [22] Jr, G. L. M., Randhawa, S. U. and McDowell, E. D. [1988], ‘Computerized container-ship load planning: a methodology and evaluation’, *Computers and Industrial Engineering* **14**, 429–440.
- [23] Kang, J. G. and Kim, Y. D. [2002], ‘Stowage planning in maritime container transportation’, *Journal of Operations Research Society* **53**, 415–416.
- [24] Kim, K. [1997], ‘Evaluation of the number of rehandles in container yards’, *Computers and Industrial Engineering* **32**, 701–711.
- [25] Kim, K. and Bae, J. [1998], ‘Re-marshaling export containers in port container terminals’, *Computers and Industrial Engineering* **35**, 655–658.
- [26] Kim, K. and Kim, H. [1998], ‘The optimal determination of the space requirement and the number os transfer cranes of import containers’, *Computers and Industrial Engineering* **35**, 427–430.
- [27] Kim, K. and Kim, H. [1999], ‘Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals’, *International Journal of Production Economics* **59**, 415–423.
- [28] Kim, K. and Kim, H. [2002], ‘The optimal sizing of the storage space and handling facilities for import containers’, *Transportation Research Part B: Methodological* **36**, 821–835.

- [29] Kim, K. and Lee, B. [2013], ‘Optimizing the yard layout in container terminals’, *OR Spectrum* **35**, 363–398.
- [30] Kim, K. and Park, K. [2003], ‘A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers’, *European Journal of Operational Research* **148**, 92–101.
- [31] Kim, K., Park, Y. and Jin, M. [2008], ‘An optimal layout of container yards’, *OR Spectrum* **30**, 675–695.
- [32] Kim, K., Park, Y. and Ryu, K. [2000], ‘Deriving decision rules to locate export containers in container yards’, *European Journal of Operations Research* **124**, 89–101.
- [33] Li, W., Wu, Y. and Goh, M. [2015], *Planning and scheduling for maritime container yards*, Springer.
- [34] Liu, Y., Zhou, C., Guo, D., Wang, K., Pang, W. and Zhai, Y. [2010], ‘A decision support system using soft computing for modern international container transportation services’, *Applied Soft Computing* **10**, 1087–10995.
- [35] Moura, A., Oliveira, J. and Pimentel, C. [2013], ‘A mathematical model for the container stowage and ship routing problem’, *Journal of Mathematical Modeling and Algorithms in Operations Research* **12**.
- [36] Navios e Navegadores [Acedido em 2015], ‘Wec Brueghel’, <http://2.bp.blogspot.com/-sa1FjIychKM/U97hFrdm1ZI/AAAAAAAAIA0/2J2nTwol6fk/s1600/NM+WEC+BRUEGHEL+1.JPG>.
- [37] Porto da Figueira da Foz [Acedido em 2015], <http://www.portofigueiradafoz.pt/>.
- [38] Sculli, D. and Hui, C. F. [1988], ‘Three dimensional stacking of containers’, *Omega* **16**, 585–594.
- [39] Shen, W. and Khoong, C. [1995], ‘A dss for empty container distribution planning’, *Transportation Research Part B: Methodological* pp. 75–82.
- [40] Shields, J. J. [1984], ‘Containership stowage: a computer-aided preplanning system’, *Marine Technology* **21**, 370–383.
- [41] Skyphoto [Acedido em 2015], ‘Porto da Figueira da Foz’, [http://www.skyphoto.pt/Panoramas/\\_2014/Figueira%20da%20Foz%20-%20Porto/1.html](http://www.skyphoto.pt/Panoramas/_2014/Figueira%20da%20Foz%20-%20Porto/1.html).
- [42] TEREX Corporation [Acedido em 2015], ‘Port technology’, <http://www.terexmhps.com/cms/site/global/Press/Picture-archive/Port-technology>.
- [43] Wei-ying, Z., Yan, L. and Zhuo-shang, J. [2005], ‘Model and algorithm for container ship stowage planning based on bin-packing problem’, *Journal of Marine Science and Application* **4**, 30–36.
- [44] Wilson, I. D. and Roach, P. A. [1999], ‘Principles of combinatorial optimization applied to container-ship stowage planning’, *Journal of Heuristics* **5**, 403–418.

- [45] Wilson, I. D. and Roach, P. A. [2000], ‘Container stowage planning: a methodology for generating computerised solutions’, *Operational Research Society* **51**, 1248–1255.
- [46] Wilson, I., Roach, P. and Ware, J. [2001], ‘Container stowage pre-planning: using search to generate solutions, a case study’, *Knowledge-Based Systems* **14**, 137–145.
- [47] Yoke, M., Low, H., Xiaio, X., Liu, F., Huang, S., Hsu, W. and Li, Z. [2009], ‘An automated stowage planning system for large containerships’, *Singapore Institute of Manufacturing Technolog* .
- [48] Zhang, C., Liu, J., Wan, Y., Murty, K. and Linn, R. [2003], ‘Storage space allocation in container terminals’, *Transportation Research Part B: Methodological* **37**, 883–903.
- [49] Zhang, W., Lin, Y., Ji, Z. and Zhang, G. [2008], ‘Review of containership stowage plans for full routes’, *Journal of Marine Science and Application* **7**, 278–285.

## Apêndice A

### Anexos

#### A.1 Informação Referente ao Movimento de Contentores nos Principais Portos de Portugal Continental, de 2004 a 2014

ANOS	PORTOS					
	Douro e Leixões	Figueira da Foz	Lisboa	Setúbal	Sines	Total
2004	228207	5027	343553	12427	12927	602141
2005	233294	5495	341173	7464	34585	622011
2006	249570	5084	343428	8632	85278	691992
2007	282423	5342	372476	7507	102118	769866
2008	293835	6829	371957	11281	157707	841609
2009	290557	6698	328258	16680	163249	805442
2010	305426	8255	337261	29696	247213	927851
2011	327563	9747	363281	43675	300714	1044980
2012	403066	9991	363281	26976	370384	1173698
2013	391436	8067	366727	37730	620909	1424869
2014	417037	10095	339627	57039	819565	1643363

Tabela A.1: Movimento de contentores nos principais portos do continente português desde 2004 até 2014, segundo o IMT.

## A.2 Exemplo de Um Plano de Estiva do Navio *Wec Bru-eghel*

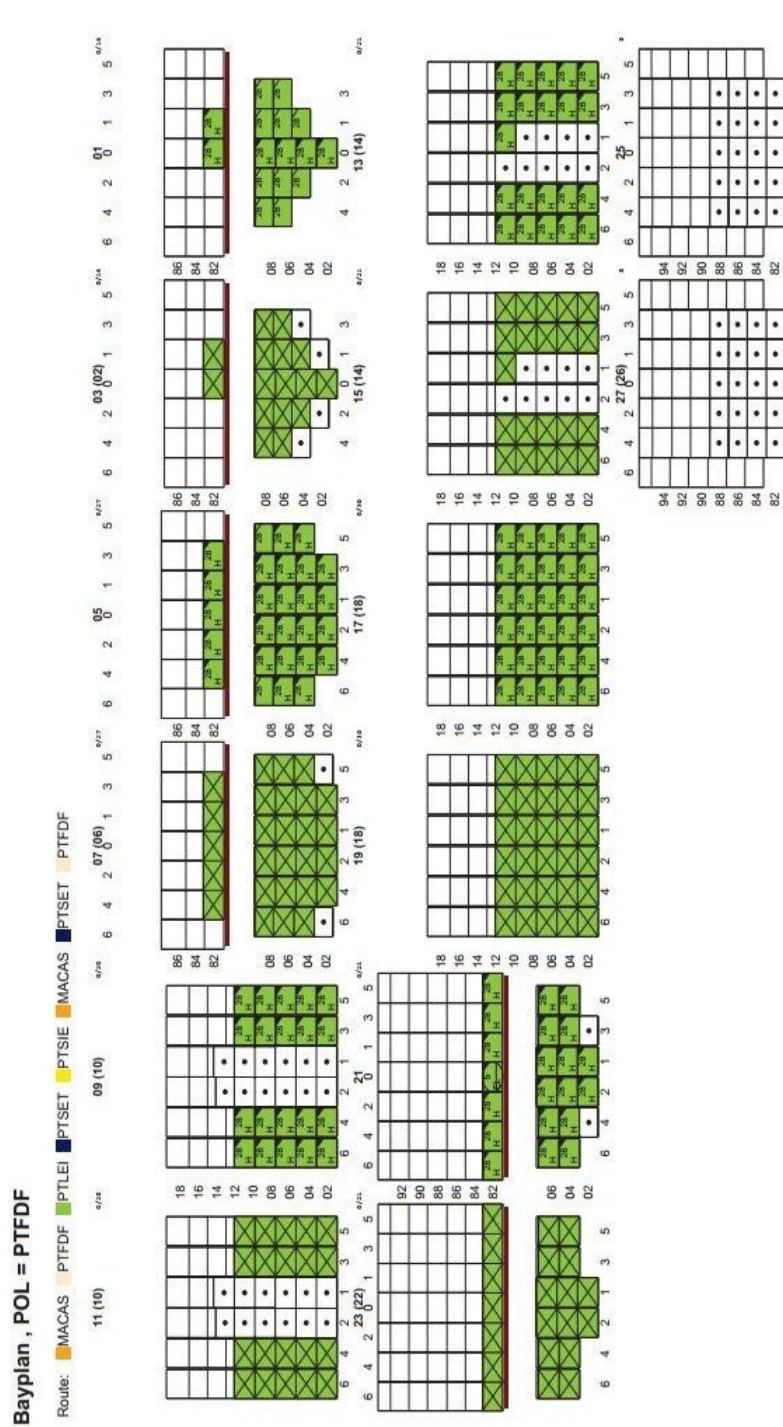


Figura A.1: Plano de estiva do navio *Wec Bru-eghel* referente a um carregamento de Fevereiro de 2016 (Imagem disponibilizada pela operadora *Liscont*).

### A.3 Informação Referente ao Tráfego da Carga Contentorizada no Porto da Figueira da Foz no Ano de 2014

MESES	Nº DE CONTENTORES			TEU		
	Importação	Exportação	Total	Importação	Exportação	Total
<b>Janeiro</b>	257	385	642	514	768	1282
<b>Fevereiro</b>	293	204	497	614	408	1022
<b>Março</b>	483	566	1049	964	1130	2094
<b>Abril</b>	567	507	1074	1143	1013	2156
<b>Maiο</b>	482	630	1112	959	1260	2219
<b>Junho</b>	278	487	765	560	969	1529
<b>Julho</b>	323	482	805	650	963	1613
<b>Agosto</b>	298	609	907	616	1218	1834
<b>Setembro</b>	248	505	753	499	1008	1507
<b>Outubro</b>	338	605	943	663	1204	1867
<b>Novembro</b>	316	458	774	631	916	1547
<b>TOTAL</b>	3883	5438	9321	7813	10857	18670

Tabela A.2: Tráfego da carga contentorizada no porto da Figueira da Foz de Janeiro a Novembro do ano de 2014 (Dados disponibilizados pela operadora *Liscont*).

Note-se que as diferenças existentes entre o número de contentores/TEU importados e exportados devem-se à variação do fluxo de encomendas do cliente e, também, às variações do mercado.

#### A.4 Instâncias Usadas na Validação do Modelo Matemático Proposto Para o CSP com 2 Portos de Destino

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	0	56
<b>DESTINO</b>	2	0	57

Tabela A.3: Instância 15

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	113	0
<b>DESTINO</b>	2	113	0

Tabela A.4: Instância 2

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	0	56
<b>DESTINO</b>	2	114	0

Tabela A.5: Instância 3

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	114	0
<b>DESTINO</b>	2	0	56

Tabela A.6: Instância 4



		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	57	28
<b>DESTINO</b>	2	56	29

Tabela A.7: Instância 5

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	5	3
<b>DESTINO</b>	2	73	71

Tabela A.8: Instância 6

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	73	71
<b>DESTINO</b>	2	5	3

Tabela A.9: Instância 7

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	0	112
<b>DESTINO</b>	2	1	0

Tabela A.10: Instância 8

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	1	0
<b>DESTINO</b>	2	0	112

Tabela A.11: Instância 9

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	0	91
<b>DESTINO</b>	2	0	91

Tabela A.12: Instância 10

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	182	0
<b>DESTINO</b>	2	182	0

Tabela A.13: Instância 11

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	0	91
<b>DESTINO</b>	2	182	0

Tabela A.14: Instância 12

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	182	0
<b>DESTINO</b>	2	0	91

Tabela A.15: Instância 13

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	91	45
<b>DESTINO</b>	2	91	46

Tabela A.16: Instância 14

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	0	181
<b>DESTINO</b>	2	1	0

Tabela A.17: Instância 15

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	1	0
<b>DESTINO</b>	2	0	181

Tabela A.18: Instância 16

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	0	180
<b>DESTINO</b>	2	3	0

Tabela A.19: Instância 17

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE</b>	1	0	179
<b>DESTINO</b>	2	3	1

Tabela A.20: Instância 18

### A.5 Instâncias Usadas na Validação do Modelo Matemático Proposto Para o CSP com 5 Portos de Destino

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	45	0
	2	45	0
	3	45	0
	4	45	0
	5	45	0

Tabela A.21: Instância 1

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	22
	2	0	22
	3	0	23
	4	0	23
	5	0	23

Tabela A.22: Instância 2

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	23	11
	2	23	11
	3	23	11
	4	23	11
	5	23	11

Tabela A.23: Instância 3

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	37
	2	0	36
	3	0	36
	4	4	0
	5	3	0

Tabela A.24: Instância 4

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	68	0
	2	69	0
	3	69	0
	4	0	6
	5	0	7

Tabela A.25: Instância 5

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	5	0
	2	4	0
	3	2	0
	4	0	53
	5	0	54

Tabela A.26: Instância 6

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	2
	2	0	3
	3	0	1
	4	107	0
	5	107	0

Tabela A.27: Instância 7

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	3	20
	2	1	16
	3	3	21
	4	2	18
	5	3	22

Tabela A.28: Instância 8

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	16	1
	2	21	3
	3	14	2
	4	23	1
	5	20	2

Tabela A.29: Instância 9

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	72	0
	2	72	0
	3	72	0
	4	72	0
	5	73	0

Tabela A.30: Instância 10

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	36
	2	0	36
	3	0	37
	4	0	37
	5	0	37

Tabela A.31: Instância 11

		<b>N.º DE CONTENTORES</b>	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	36	18
	2	36	18
	3	36	18
	4	36	18
	5	37	19

Tabela A.32: Instância 12

		<b>N.º DE CONTENTORES</b>	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	54
	2	0	54
	3	0	54
	4	11	0
	5	9	0

Tabela A.33: Instância 13

		<b>N.º DE CONTENTORES</b>	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	112	0
	2	112	0
	3	113	0
	4	0	12
	5	0	13

Tabela A.34: Instância 14



		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	45
	2	0	45
	3	0	45
	4	0	45
	5	0	1

Tabela A.35: Instância 15

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	60
	2	0	60
	3	0	60
	4	1	0
	5	0	1

Tabela A.36: Instância 16

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	80
	2	0	80
	3	3	0
	4	0	10
	5	0	10

Tabela A.37: Instância 17

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	178
	2	3	0
	3	0	0
	4	0	1
	5	0	1

Tabela A.38: Instância 18

## A.6 Instâncias Usadas na Validação do Modelo Matemático Proposto Para o CSP com 10 Portos de Destino

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	22	0
	2	22	0
	3	24	0
	4	22	0
	5	22	0
	6	24	0
	7	22	0
	8	24	0
	9	22	0
	10	22	0

Tabela A.39: Instância 1

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	11
	2	0	11
	3	0	12
	4	0	11
	5	0	11
	6	0	12
	7	0	11
	8	0	12
	9	11	0
	10	11	0

Tabela A.40: Instância 2

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	12	5
	2	10	6
	3	12	6
	4	12	5
	5	10	6
	6	12	6
	7	12	5
	8	12	6
	9	12	5
	10	10	6

Tabela A.41: Instância 3

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	21
	2	0	23
	3	0	22
	4	0	21
	5	0	21
	6	2	0
	7	2	0
	8	1	0
	9	3	0
	10	2	0

Tabela A.42: Instância 4

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	40	0
	2	41	0
	3	40	0
	4	40	0
	5	40	0
	6	0	3
	7	0	2
	8	0	1
	9	0	3
	10	0	3

Tabela A.43: Instância 5

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	1	0
	2	2	0
	3	1	0
	4	3	0
	5	2	0
	6	0	21
	7	0	22
	8	0	20
	9	0	20
	10	0	21

Tabela A.44: Instância 6

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	4
	2	0	3
	3	0	3
	4	0	4
	5	0	3
	6	38	0
	7	39	0
	8	37	0
	9	39	0
	10	39	0

Tabela A.45: Instância 7

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	2	11
	2	1	10
	3	1	10
	4	3	12
	5	2	10
	6	1	10
	7	3	10
	8	2	10
	9	2	10
	10	1	11

Tabela A.46: Instância 8

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	22	1
	2	18	3
	3	18	2
	4	20	2
	5	19	1
	6	18	1
	7	18	1
	8	19	3
	9	20	2
	10	20	2

Tabela A.47: Instância 9

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	36	0
	2	36	0
	3	36	0
	4	36	0
	5	36	0
	6	36	0
	7	36	9
	8	36	0
	9	38	0
	10	38	0

Tabela A.48: Instância 10

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	18
	2	0	18
	3	0	18
	4	0	18
	5	0	18
	6	0	18
	7	0	18
	8	0	19
	9	0	24
	10	0	19

Tabela A.49: Instância 11

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	18	9
	2	18	9
	3	18	9
	4	18	9
	5	18	9
	6	18	9
	7	18	9
	8	18	9
	9	18	9
	10	19	10

Tabela A.50: Instância 12

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	54
	2	0	54
	3	0	54
	4	0	54
	5	0	55
	6	10	0
	7	10	0
	8	8	0
	9	10	0
	10	8	0

Tabela A.51: Instância 13



		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	12	0
	2	12	0
	3	12	0
	4	10	0
	5	10	0
	6	0	31
	7	0	31
	8	0	31
	9	0	31
	10	0	30

Tabela A.52: Instância 14

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	20
	2	0	20
	3	0	20
	4	0	20
	5	0	20
	6	0	20
	7	0	20
	8	0	20
	9	0	21
	10	1	0

Tabela A.53: Instância 15

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	22
	2	0	22
	3	0	22
	4	0	22
	5	0	22
	6	0	22
	7	0	23
	8	0	23
	9	1	0
	10	0	3

Tabela A.54: Instância 16

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
<b>PORTOS DE DESTINO</b>	1	0	25
	2	0	26
	3	0	26
	4	0	26
	5	9	26
	6	0	25
	7	0	25
	8	1	0
	9	0	1
	10	0	1

Tabela A.55: Instância 17

		N.º DE CONTENTORES	
		20' de comprimento	40' de comprimento
PORTOS DE DESTINO	1	0	35
	2	8	35
	3	0	35
	4	0	35
	5	0	36
	6	3	0
	7	0	1
	8	0	1
	9	0	1
	10	0	1

Tabela A.56: Instância 18